



ISSN: 1646-8929

***IET Working Papers Series***

**No. [WPS10/2009](#)**

Hugo Gil Silva

(e-mail: [hugogilsilva@gmail.com](mailto:hugogilsilva@gmail.com) )

Marcos Afonso

(e-mail: [maa18899@fct.unl.pt](mailto:maa18899@fct.unl.pt) )

|   |
|---|
| <p>Energia solar fotovoltaica: Contributo para um <i>roadmapping</i> do seu desenvolvimento tecnológico</p> |
|---|

**IET**

**Research Centre on Enterprise and Work Innovation**

**Centro de Investigação em Inovação Empresarial e do Trabalho**

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Universidade Nova de Lisboa

Monte de Caparica

Portugal

# **ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: Contributo para um *Roadmapping* do seu Desenvolvimento Tecnológico <sup>1</sup>**

Hugo Gil Silva, Marcos Afonso

[entregue para publicação: domingo, 19 de Julho de 2009]

---

<sup>1</sup> Trabalho realizado sob orientação do Prof. António Brandão Moniz para a disciplina “Sócio-Economia da Inovação” do Mestrado Engenharia Integrado em Engenharia Electrotécnica e Computadores realizado na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (Portugal).

## Abstract

---

The main goal for this report is to alert for the need of a continuous investment in policies that should be developed worldwide, with respect to research and development (R&D), at all levels, in photovoltaic energy. The R&D in this area leads to a strong and possible solution to the actual environmental problems. Such problems are based on the climate change due to polluted gas emissions and due to the non-renewable resources exhaustion.

Therefore, this contribution for a roadmap of photovoltaic technology aims to support the knowledge on projects that allow photovoltaic module cost reduction, efficiency and longevity improvement. In this paper we analyze the implemented policies and projects that were and are being developed worldwide. A development monitoring is done in photovoltaic energy since its origin, in order to predict its evolution in actual market.

The data was analyzed and the conclusion was drawn that the solar energetic consumption evolution is related to the efficiency improvement and cost reduction in photovoltaic technologies, mainly due to the rising competitiveness among other sources of energy. The non-dependency on non-renewable and pollutant resources implies a significant rising of hope for a better future.

**Key words:** photovoltaic energy; renewable resources

**JEL codes:** O31; Q29

## Resumo

---

O objectivo principal para este projecto, é alertar para a necessidade de um investimento contínuo em políticas que devem ser desenvolvidas mundialmente, no que diz respeito à pesquisa e desenvolvimento (P&D), a todos os níveis, na energia fotovoltaica. P&D nesta área representa uma solução forte e possível para os problemas existentes actualmente, tais como as alterações climáticas devido à emissão de gases poluentes, bem como devido ao esgotamento de recursos não-renováveis.

Assim, este *roadmap* para as tecnologias fotovoltaicas pode permitir um contínuo desenvolvimento de projectos que permitem a redução de custos dos módulos fotovoltaicos e o seu aumento na eficiência e longevidade. Neste trabalho nós analisamos as políticas implementadas e projectos que foram e estão a ser desenvolvidos a nível mundial. É feito um acompanhamento do desenvolvimento da energia fotovoltaica desde a sua origem, com o intuito de prever a sua evolução no mercado actual.

A informação foi analisada e conclui-se que a evolução do consumo energético está relacionada com o melhoramento da eficiência e redução dos custos das tecnologias fotovoltaicas, principalmente devido à crescente competitividade entre outras fontes energéticas. A não-dependência em recursos poluentes não-renováveis implica um aumento significativo na esperança por um futuro melhor.

## Índice

|  |    |
|--|----|
| 1 – Introdução .....   | 5  |
| 1.1 - Introdução histórica .....                               | 5  |
| 1.2-Sistema fotovoltaico .....                                 | 6  |
| 1.2.1-Princípio de funcionamento.....                          | 6  |
| 1.2.2- Aplicações .....  | 8  |
| 1.2.3- Tipos de sistemas fotovoltaicos .....                   | 9  |
| 2 – Tecnologia PV .....  | 13 |
| 2.1- Células PV de 1ª geração.....                             | 13 |
| 2.1.1-Materiais cristalinos.....                               | 13 |
| 2.2- Células PV de 2ª geração.....                             | 15 |
| 2.2.1- Materiais de película fina ( <i>“Thin film”</i> ) ..... | 15 |
| 2.3- Células PV de 3ª geração.....                             | 19 |
| 2.3.1- Materiais Cristalinos - Arseneto de gálio (GaAs).....   | 19 |
| 2.4- Células PV e o futuro – enquadramento em I&D.....         | 19 |
| 2.4.1- Tecnologias emergentes .....                            | 20 |
| 2.4.2- Tecnologias inovadoras.....                             | 23 |
| 2.4.1- Tecnologias por Concentrador (CPV) .....                | 26 |
| 3 – Enquadramento I&D da energia fotovoltaica .....            | 28 |
| 3.1 – Agenda internacional .....                               | 29 |
| 3.1.1 – Japão.....   | 29 |
| 3.1.2 - Estados Unidos da América.....                         | 34 |
| 3.1.3 – Visão Geral.....                                       | 36 |
| 3.2. – Agenda europeia .....                                   | 38 |
| 3.3. – Agenda nacional .....                                   | 39 |
| 3.3.1. – Programa Nacional .....                               | 39 |
| 3.3.2. – Pesquisa e desenvolvimento .....                      | 41 |
| 4. Projectos do Programa-Quadro Europeu.....                   | 44 |
| 4.1. – FP6.....  | 44 |
| 4.2. – FP7.....  | 48 |
| 4.3. – Conclusões.....   | 50 |
| 5. Conclusão .....   | 52 |
| 5 – Bibliografia.....  | 53 |
| 6 – Bibliografia de imagens .....                              | 54 |

## 1 – Introdução

### 1.1 - Introdução histórica

A geração de electricidade a partir de energia solar como nós conhecemos actualmente apenas é possível devido às várias descobertas no passado. Podemos destacar a data de 1839, quando Alexandre-Edmond Becquerel, físico experimental francês, descobriu o efeito fotovoltaico num electrólito. Em 1923, Albert Einstein recebe o prémio Nobel pelos trabalhos em efeitos fotoeléctricos [7].

É só por volta de 1930, que surge a produção de electricidade a partir de energia solar, inicialmente com células de óxido de cobre e, posteriormente, de selénio. No entanto é em 1954, com a realização das primeiras células fotovoltaicas (PV<sup>2</sup>) de silício, nos laboratórios da companhia *Bell Telephone*, que se perspectiva a possibilidade de fornecer energia. No ano seguinte a célula de silício viu a sua primeira aplicação como fonte de alimentação de uma rede telefónica em Americus, na Geórgia [14] (Figura 1). O rápido desenvolvimento e progresso das células PV foram estimulados pela sua utilização em toda a indústria espacial.



Figura 1 – Bateria solar original (painel fotovoltaico) de Bell.

---

<sup>2</sup> PV – Fotovoltaico, do inglês *Photovoltaic*.

No decorrer dos anos 80 [7], a tecnologia fotovoltaica terrestre progrediu regularmente através da instalação de várias centrais de alguns Mega Watt e passou mesmo a ser familiar para grande parte dos consumidores através de numerosos produtos de baixa potência tais como relógios, calculadoras, iluminações de jardim, instalações meteorológicas, bombas de água e frigoríficos solares.

Globalmente, é positiva a evolução da tecnologia e do mercado fotovoltaico. A melhoria dos métodos de fabrico, assim como o aumento do volume de produção permitiram uma redução dos custos. A produção mundial de módulos fotovoltaicos passou de 5 MWc em 1982 para 60 MWc em 1992 [15].

Actualmente, 90% da produção total de módulos é feita no Japão, nos EUA e na Europa, principalmente através das grandes companhias como a Siemens, Sanyo, Kyocera, Solarex e BP Solar, que detêm 50% do mercado mundial. Os restantes 10% da produção vêm do Brasil, Índia e China, que são os principais produtores de módulos fotovoltaicos, no seio dos países em vias de desenvolvimento [15].

## **1.2-Sistema fotovoltaico**

Uma das formas de aproveitar a energia solar é através de sistemas fotovoltaicos que usando células solares inseridas em módulos fotovoltaicos convertem energia proveniente do sol em electricidade.

Os sistemas fotovoltaicos vieram substituir com sucesso, outros meios de produção de energia alternativa, nomeadamente em sistemas de pequena potência. Graças também ao seu uso na indústria espacial, estes sistemas ganharam outra importância, e o seu desenvolvimento expandiu-se para o terreno, onde na indústria e a nível doméstico a geração de electricidade por painéis fotovoltaicos ganhou outro significado.

O reduzido rendimento, assim como o elevado custo dos painéis, fazem com que a exploração se efectue de forma a obter a máxima potência disponível ao nível do gerador PV. Normalmente, este máximo obtém-se através de uma boa adaptação entre o gerador PV e a carga associada. Esta adaptação efectua-se através de conversores estáticos funcionando em modos diversos.

### **1.2.1-Princípio de funcionamento**

Todo o sistema fotovoltaico é constituído por células solares fotovoltaicas (PV), o módulo mais importante do sistema. Estas células convertem a irradiação solar em electricidade a partir de processos que se desenvolvem ao nível atómico nos materiais de que são constituídas – efeito fotovoltaico. Este efeito fotovoltaico, transformação da energia solar "fotão" em energia solar "volt" foi descoberto em 1839 pelo físico A.E. Becquerel (como

referido anteriormente) [7]. Não entraremos em grande detalhe em termos do efeito fotovoltaico a nível atómico, visto não acharmos ser relevante para o trabalho em questão.

Foi baseado neste efeito que foram desenvolvidas as células PV. As células PV são constituídas por pelo menos duas camadas de material semiconductor onde é produzida a corrente eléctrica. O material semiconductor mais utilizado nestas células é o silício, ao qual são adicionadas substâncias, ditas “dopantes”, de modo a criar um meio adequado ao estabelecimento do efeito fotovoltaico, isto é, conversão directa da potência associada à radiação solar em potência eléctrica DC. Uma destas camadas possui carga positiva (tipo N), e a outra carga negativa (tipo P). Quando a luz penetra a célula, alguns dos fotões provenientes desta luz são absorvidas pelos átomos do semiconductor, libertando electrões da camada negativa da célula (tipo P) que circulam através do circuito externo, voltando depois à camada positiva (tipo N). Este fluxo de electrões produz uma corrente eléctrica (Figura 2). A carga externa poderá ser vista como um dispositivo que necessite de corrente eléctrica, seja uma lâmpada, uma bateria ou até mesmo a rede de electricidade [15].

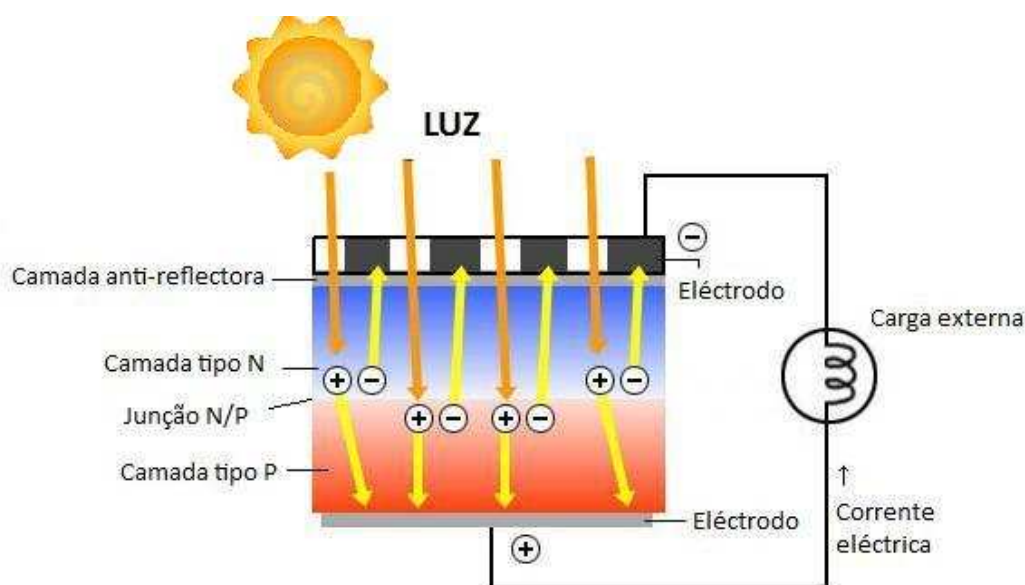


Figura 2 – Corrente eléctrica gerada pela luz solar incidente.

A célula é o elemento mais pequeno do sistema fotovoltaico, produzindo tipicamente potências eléctricas da ordem de 1,5 W (correspondentes a uma tensão de 0,5 V e uma corrente de 3 A) [18].

Para obter potências superiores, as células solares são conectadas em série e/ou paralelo e encapsuladas em módulos entre um vidro e um fundo (tipicamente com potências da ordem de 50 a 100 W), essencialmente para evitar a sua degradação com os factores

atmosféricos – vento, chuva, poeira, vapor, etc. – e manter assim as condições ideais de operação por dezenas de anos. Quando dois módulos são ligados em paralelo, a sua corrente duplica enquanto a tensão mantém-se constante. Para atingir a tensão e corrente desejadas, os módulos são ligados de forma em paralelo e série numa grelha de módulos fotovoltaicos (Figura 3) [18].

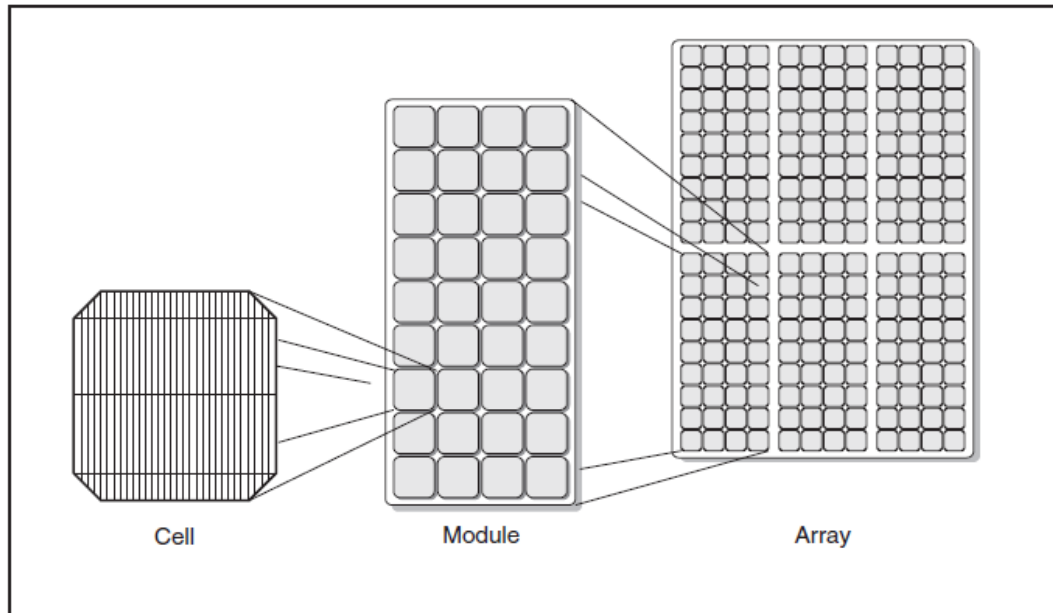


Figura 3 - Células, módulos e grelha fotovoltaica.

### 1.2.2- Aplicações

Os sistemas fotovoltaicos actualmente, podem ser usados em:

- **Aplicações de pequena potência** (décimas ou unidades de quilowatt) – por exemplo pequenos dispositivos como relógios, calculadoras, sinais rodoviários, parquímetros, telefones de emergência, transmissores de TV, entre outros.





Figura 4 - Bateria solar para pequenos produtos electrónicos digitais e móveis, tais como PDA, Leitor MP3, Leitor CD, iPod e câmara digital.

- ou **aplicações de média potência** (dezenas ou centenas de quilowatt) – por exemplo na electrificação rural (abastecimento de cargas domésticas em locais remotos sem rede, bombagem de água), ou mesmo produção descentralizada da rede.



Figura 5 - Sistema de irrigação alimentado por energia solar.

### 1.2.3- Tipos de sistemas fotovoltaicos

Um sistema fotovoltaico é basicamente constituído pelos seguintes componentes:

- **Painéis fotovoltaicos** - constituídos pelas células PV, são o componente essencial;
- **Inversores** – conversor de corrente DC para AC;
- **Controladores/reguladores de carga** – controla o fluxo de energia e protege as baterias
- **Baterias solares** – baterias “tolerantes”, que suportam frequentes cargas e descargas.

Dependo do tipo de sistema de sistema fotovoltaico, diferentes componentes ou dispositivos de monitorização podem ser adicionados a estes. Para aplicações de **média potência**, podem-se ter principalmente três tipos de sistemas fotovoltaicos:

### - Sistemas autónomos

Num sistema autónomo, as cargas são alimentadas directamente. Estes sistemas dependem apenas da energia solar para responder às exigências do consumo. É por este motivo que o seu dimensionamento é feito com base no mês com menos sol, visto que é necessário assegurar a quantidade suficiente de energia durante todo o ano. Para além dos colectores fotovoltaicos estes sistemas possuem ainda:

- Baterias - de forma a armazenar energia produzida, asseguram assim o abastecimento nos períodos em que a energia solar é insuficiente para alimentação da carga. Estas baterias são carregadas quando o recurso permite obter uma potência superior à potência de carga.

- Regulador de carga – efectua a gestão da carga de forma a obter perfis compatíveis com a radiação disponível e a capacidade das baterias.

- Inversor (conversor DC/AC) – é necessário se existirem cargas alimentadas em corrente contínua (AC). No caso de pequenos dispositivos como calculadoras ou parquímetros apenas DC é necessário, mas para sistemas maiores como edifícios ou bombas de água o AC é normalmente necessário [15, 19].

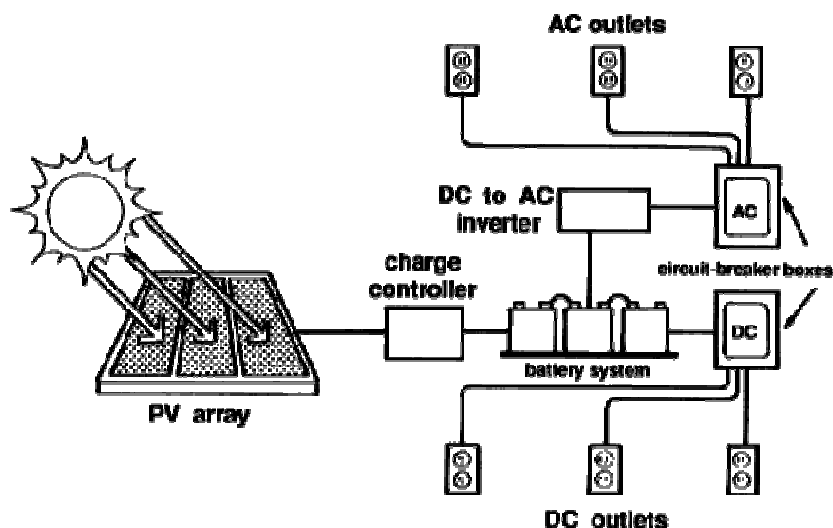


Figura 6 – Sistema autónomo com cargas que necessitam de corrente DC – alimentadas directamente das baterias – e cargas que necessitam de corrente AC – necessitando de um inversor para a conversão DC-AC.

### - Sistemas híbridos

Estes sistemas são igualmente independentes da rede de distribuição eléctrica, alimentando directamente cargas isoladas, onde se combinam com outros conversores de energias renováveis, por exemplo um gerador eólico ou até mesmo um gerador a combustível.

Um sistema deste tipo constitui uma boa escolha para aplicações que necessitem de uma alimentação permanente e de uma potência relativamente elevada, quando não se pretende efectuar um elevado investimento em módulos fotovoltaicos e baterias [15, 19].

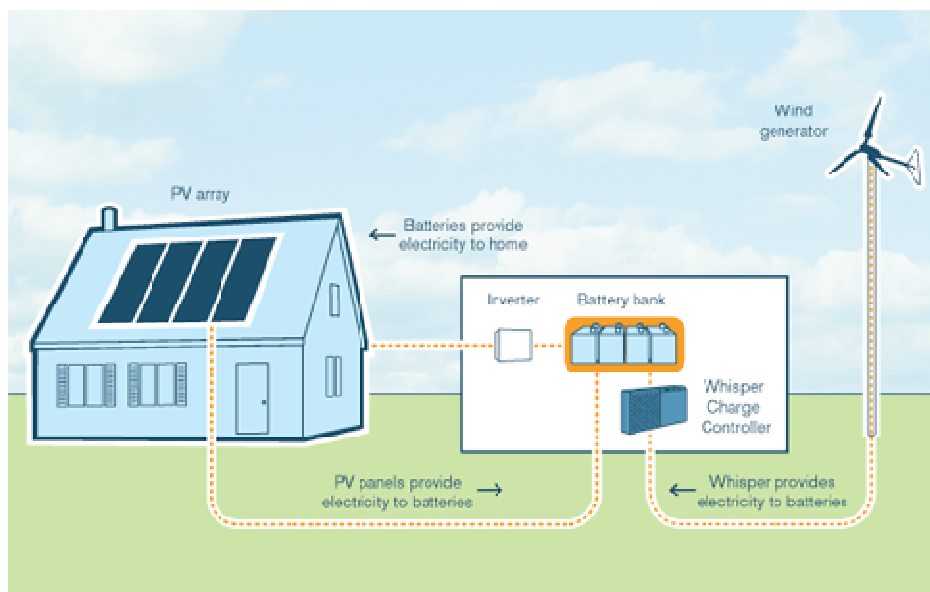


Figura 7 – Sistema híbrido com painéis fotovoltaicos e um gerador eólico a fornecer electricidade a uma habitação.

#### - Sistemas ligados à rede eléctrica

Os sistemas de produção de energia fotovoltaica ligados à rede são uma resultante da tendência para a descentralização da produção eléctrica. Um sistema ligado à rede produz a sua própria energia e encaminha o excedente para a rede, na qual também se abastece, em caso de necessidade, eliminando assim a necessidade de adquirir e manter uma bateria de acumuladores.

Os sistemas mais importantes compreendem um inversor (conversor DC/AC) que pode estar ligado a diversos painéis (tal como no caso dos sistemas não ligados à rede). Este dispositivo, que serve de elemento de interface entre o painel e a rede, converte a corrente contínua em corrente alternada e sincroniza a corrente de saída com a da rede de forma a reduzir o consumo a partir da rede. A rede assume o papel de uma bateria de acumuladores infinita.

Este tipo de sistemas é indicado para regiões de clima quente, onde o custo de kWh produzido por sistema fotovoltaico ligado à rede é equivalente ao de outras formas de produção de electricidade [15, 19].

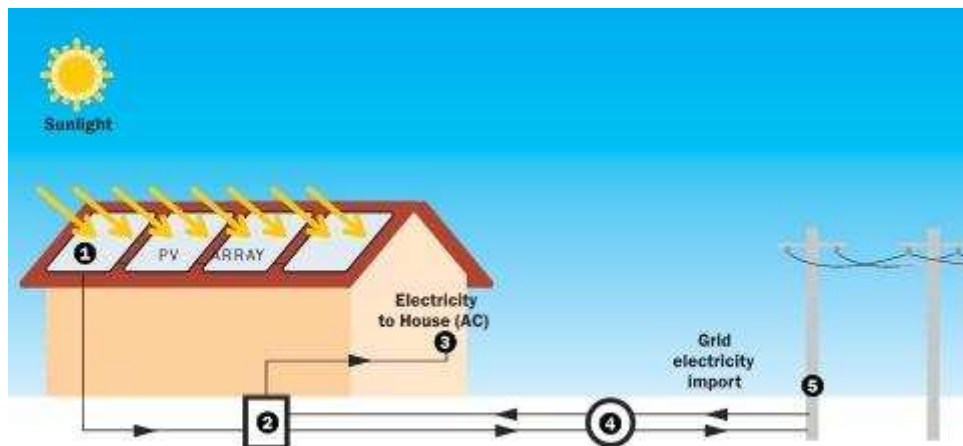


Figura 8 – Sistema ligado à rede. 1 – Painéis fotovoltaicos; 2 – Inversor; 3 – Electricidade fornecida à habitação (por energia solar ou pela rede se necessário); 4 – Medidor medindo a produção de electricidade e consumo; 5 – Algum excesso de energia é “exportada” para a rede eléctrica.

## 2 – Tecnologia PV

Ao longo dos anos muitos têm sido os esforços para o melhoramento do desempenho de rentabilidade dos painéis PV, tanto a nível de materiais como de fabrico, para melhores rendimentos e custos por Watt. Várias tecnologias foram sendo desenvolvidas, e novos progressos estão a ser feitos a vários níveis.

Actualmente, a maioria das células PV comerciais são fabricadas com o semicondutor silício, o mesmo material do qual a areia é feita, no entanto para este caso, o silício é extremamente puro.

Os tipos de materiais maioritários são os **materiais cristalinos** e os de **película fina** (*thin-films*), que variam entre si em termos de eficiência de absorção de luz, eficiência de conversão de energia, o processo e tecnologia de fabrico e custo de produção.

### 2.1- Células PV de 1ª geração

Actualmente, 90% da energia gerada por painéis fotovoltaicos é de primeira geração. A produção de PV é dominada por células solares de junção simples em “*wafers*” de silício incluindo um cristal único de silício (poli-cristalino c-Si) ou silício multi-cristalino (mc-Si). É a estes painéis de junção simples, e camada de silício que chamamos Painéis fotovoltaicos de primeira geração [16].

#### 2.1.1-Materiais cristalinos

As células baseadas em “*wafers*” de silício cristalino têm dominado a indústria fotovoltaica desde o início da era solar fotovoltaica.

O mercado total fotovoltaico tem aumentado bastante na última década, crescendo quase 50% por ano nos últimos cinco anos, sendo que mais de 90% desse crescimento é devido ao silício cristalino [11].

##### 2.1.1.1- Cristal único de Silício (*mono-cristalino*)

Este tipo de células é sem dúvida a mais usada na indústria fotovoltaica, muito devido à sua ampla disponibilidade, fiabilidade e bom conhecimento da tecnologia. Para o seu fabrico, o silício é purificado, derretido e colocado em lingotes onde é cristalizado para formar as

“*wafers*”. São então processadas de forma a formarem células solares, e de seguida interligam-se electricamente, e encapsulam-se as células para formar um módulo.

O silício mono-cristalino possui uma estrutura molecular uniforme. Em comparação com materiais não cristalinos, a sua uniformidade resulta num alto rendimento de conversão de energia. Quanto maior o rendimento de conversão da célula, maior a quantidade de electricidade gerada para uma certa área exposta á luz.

Para módulos comerciais de silício mono-cristalino, o rendimento de conversão normalmente é cerca de 15-20%, ou seja consegue produzir cerca de 15-20% da energia incidente na célula em electricidade. Estes painéis possuem um custo de produção mais elevado do que as células do tipo que se segue [20].



Figura 9 –Célula solar de silício mono-cristalino.

#### 2.1.1.2- Silício poli-cristalino (multi-cristalino)

As células de silício poli-cristalino são fabricadas e operadas de uma maneira semelhante ao silício mono-cristalino. Consistem em pequenos cristais únicos de silício, e são menos eficientes energeticamente que as células anteriores, embora o seu custo seja actualmente o menor do mercado.

A superfície das células poli-cristalinas possui um padrão aleatório de fronteiras de cristais ao contrário da cor sólida das células mono-cristalinas. O rendimento de conversão energética para um módulo comercial é cerca de 10-14% [20].

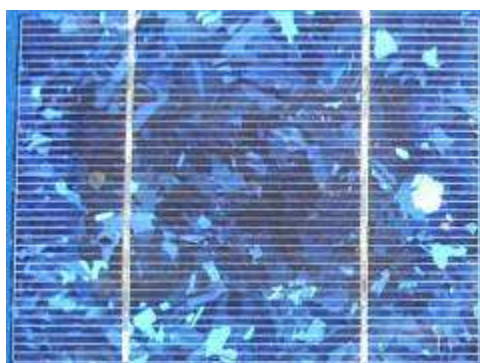


Figura 10 - Célula solar de silício poli-cristalino

Existem diferentes tipos de painéis poli-cristalinos:

**Molde de Poli-silício** : neste processo, o silício derretido é moldado num bloco, que se torna silício cristalino quando arrefecido. Este bloco arrefecido pode ser serrado ao longo da sua largura para criar “wafers” finas que podem ser usadas nas células PV. Estas células são então agregadas num painel e tiras metálicas condutoras são colocadas sobre as células para as conectar e poder-se formar uma corrente eléctrica através do painel.

**Silício “String Ribbon” (fita de corda):** usam também o silício derretido, mas são produzidos através da extracção lenta de uma corda fina de silício cristalino em vez de moldar o silício no bloco. Estas cordas de material semiconductor são então agregadas num painel com cordas condutoras de metal conectando cada corda para formar uma corrente. Este processo é menos dispendioso que o processo anterior porque elimina a necessidade de serrar “wafers” de um bloco de silício, para além que algumas tecnologias deste tipo possuem maiores níveis de rendimentos que o processo de molde de poli-silício.

## 2.2- Células PV de 2ª geração

A segunda geração de painéis fotovoltaicos basicamente mantém todo o rendimento e eficiência da primeira geração, mas reduz muito o custo destes usando menos material na sua construção, reduzindo a relação \$/W. Os painéis desta geração conseguem através do uso de materiais diferentes, como as películas finas (“*thin films*” incluindo a-Si, cobre-índio/gálio-selénio/”sulfide” - CIGS, CdTe/CdS ou p-Si) depositados em substratos mais baratos (vidro por exemplo) e usando apenas 1-10 µm de material activo, absorver com mais eficiência energia do espectro solar que na geração anterior [16].

### 2.2.1- Materiais de película fina (“*Thin film*”)

Nas células de película fina, uma camada fina de semiconductor de material fotovoltaico é depositado numa cama de baixo custo como uma camada de vidro, metal ou folhas de plástico. Como os materiais de película fina possuem uma maior absorção de luminosidade que os materiais cristalinos, a camada depositada de materiais PV é extremamente fina: de alguns micrómetros a pouco menos do que um micrómetro<sup>3</sup> [20].

Estas células possuem um processo de fabrico menos dispendioso e versátil, podendo ser produzidos com maior eficiência. Como este tipo de células podem ser aplicados como camadas finas de diferentes materiais, é possível fabricar painéis mais flexíveis, moldados, e

---

<sup>3</sup> Uma célula amorfa pode ter aproximadamente 0.3 micrómetros



em tamanhos incomuns. No entanto, as células PV de película fina possuem um pobre rendimento de conversão devido à sua não estrutura de cristais únicos, sendo necessário maiores áreas de células para obter o mesmo resultado que as células de materiais cristalinos.



Figura 11 – Grelha de película fina em Dimbach, Alemanha. 1,45 MW  
grelha total, 1,3 MW usando primeiro módulo solar de película fina.

Existem três maioritárias tecnologias de película fina inorgânica, e todas elas têm sido fabricadas em escala piloto (1-2 MWp) e estão a ser, ou têm vindo a ser fabricadas em produções de escala maior (10 a 50 MWp) [11]. Estas três tecnologias são:

#### *2.2.1.1- Silício amorfo/microcristalino (TFSi)*

As células PV TFSi são baseadas em silício amorfo (a-Si) ou em tiras de silício-germânio (a-SiGe), silício microcristalino ( $\mu\text{c-Si}$ ) - considerado de 3ª geração, tal como processos envolvendo grandes escalas de recristalização do silício.

O silício amorfo (a-Si) é uma forma não cristalina de silício, ou seja, os seus átomos encontram-se desordenados estruturalmente. A grande vantagem do “a-Si” é a sua alta absorção de luz, cerca de 40 vezes maior que o silício mono-cristalino. Portanto apenas uma camada fina de “a-Si” é suficiente para fazer células PV. O custo total de material e fabrico é mais baixo por unidade de área quando comparando com células de silício cristalino. Duas grandes barreiras desta tecnologia são o seu rendimento de conversão energético baixo (5-9%) e o seu problema de fiabilidade no exterior, em qual os seus rendimentos vão sendo reduzidos passado alguns meses de exposição à luz solar, perdendo 10 a 15% [11].

A introdução de técnicas avançadas a baixo custo e a realização de módulos de maior rendimento são a chave para um sucesso a longo prazo da tecnologia. Os melhores rendimentos de conversão energéticos típicos são 9,5% (a-Si), 12% ( $\mu\text{c-Si}$ ) e 13% (junção tripla usando tiras de “SiGe”- considerada tecnologia de 3ª geração) [11].



Depois de duas décadas de lento desenvolvimento, a indústria de “TFSi” está a renascer, graças a novas tecnologias como o “ $\mu\text{-Si}$ ” e o desenvolvimento de produção em grande escala [11].

#### 2.2.1.2 – Cádmio telúrico (CdTe)

As atractivas características do CdTe são a sua simplicidade e estabilidade química, de uma alta natureza iónica, imune a danos na sua estabilidade aquando a absorção de fotões. As suas propriedades favoráveis termo-físicas e robustez química fazem com que as células CdTe sejam de fabrico barato. A eficiência das células CdTe depende em como as camadas feitas, da temperatura a que as camadas são depositadas e em que substrato é depositado. As camadas de CdTe são feitas a altas temperaturas (600 °C) em células de vidro não alcalinas com cerca de 16,5% de rendimento <sup>4</sup>, enquanto para rendimentos mais baixos as células CdTe são feitas a baixas temperaturas ou em outros tipos de substrato [11].

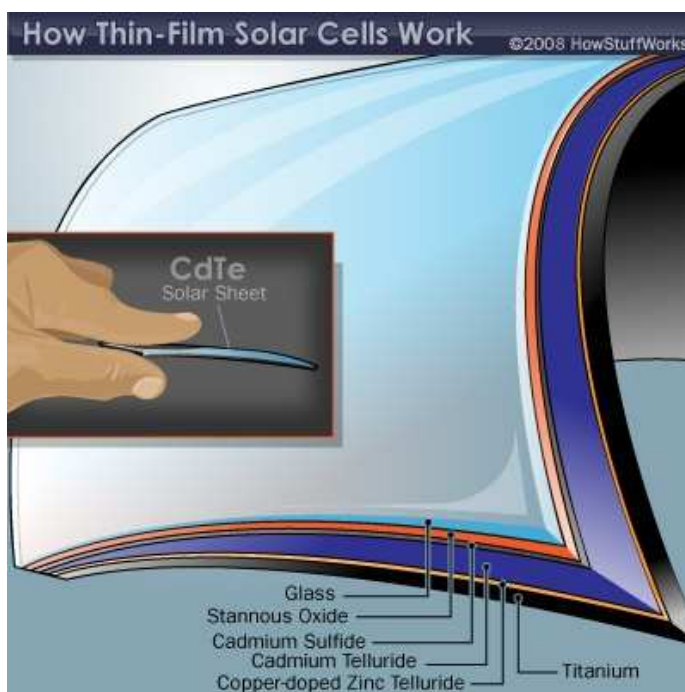


Figura 12 – Constituição de uma célula solar de película fina (tecnologia CdTe).

Outra desvantagem deste tipo de células é o facto de o cádmio ser uma substância tóxica.

#### 2.2.1.2 – Cobre-Índio-Gálio-Selénio (CIGS)

<sup>4</sup> Podemos considerar já tecnologia de 3ª geração.

Um composto semiconductor poli-cristalino de cobre, índio e selênio, CIS, tem sido uma das maiores áreas de desenvolvimento na indústria das películas finas. O CIGS é um semiconductor também usado em células fotoelétricas, cuja fórmula química é  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  (cobre,índio,gálio e selênio). Ao contrário das células feitas com silício que são baseadas numa junção p-n de um mesmo material, as células CIGS são feitas com várias camadas ultra finas de diferentes semicondutores, cada qual com diferentes “gaps” de energia.

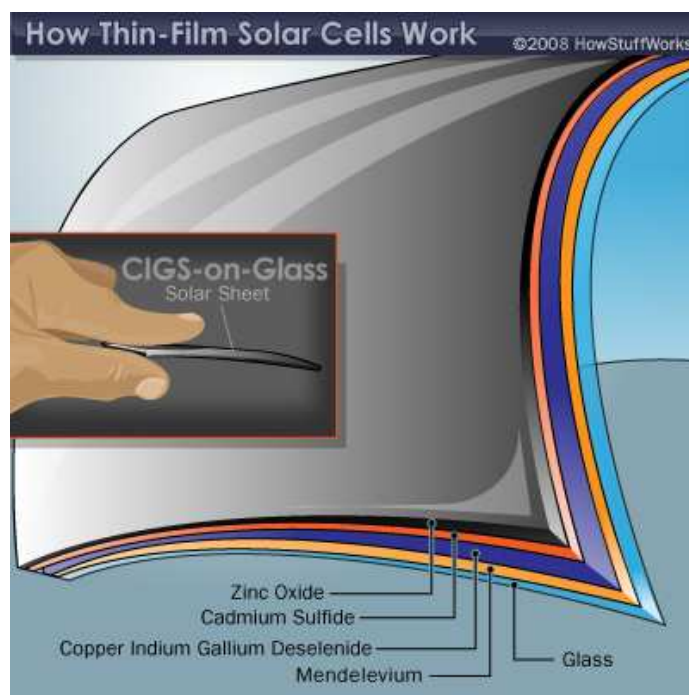


Figura 13 – Constituição de uma célula solar de película fina (tecnologia CIGS).

Este material, quando dopado com material tipo p, apresenta uma alta capacidade de absorção de luz, sendo que uma camada de apenas 1  $\mu\text{m}$  de espessura absorve cerca de 90% da luz solar incidente. Com isso, é necessária uma quantidade relativamente pequena de material para sua fabricação, quando comparado com outros tipos de célula.

As vantagens/desvantagens de uma célula tipo CIGS em comparação com outras tecnologias do mercado (em particular células de silício, que constitui 95% do mercado de células solares no mundo [17]) são basicamente:

- Economia de materiais: Devido à alta absorção do  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ , é necessária uma camada de da ordem de 1  $\mu\text{m}$  de espessura, enquanto células de silício necessitam de camadas da ordem de 200 a 300  $\mu\text{m}$  [11];

- Eficiência: as células CIGS possuem uma eficiência de 18,8% para pequenas áreas, e de 11,8% para grandes áreas ( $0,3 \times 1,2 \text{ m}^2$ ) [11].

## 2.3- Células PV de 3ª geração

Nesta geração os fotovoltaicos ganham um nível de alta eficiência para os mesmos custos na 1G/2G, reduzindo a relação preço/potência.

Como exemplo de painéis desta geração temos os “thin-films” GaInP/GaAs/Ge de tripla junção usado em satélites, mostrando uma eficiência de 32%, e tendo um custo bastante elevado, impensável para aplicações terrestres. Em termos de fotovoltaicos de preço reduzido temos como exemplo, as hetero-estruturas a-Si/  $\mu$ c-Si “*micromorph*” de Kanekas (11,7% de eficiência), e dispositivos de junção tripla de a-Si/a-SiGe [16].

### 2.3.1- Materiais Cristalinos - Arseneto de gálio (GaAs)

O arseneto de gálio possui uma estrutura semelhante ao do silício, sendo um composto semiconductor de dois elementos: gálio (Ga) e arsénico (As). Uma das vantagens do GaAs é o seu elevado grau de absorção de luminosidade, tal como o seu rendimento de conversão energética superior ao do silício, chegando a 25-30% [16].

A sua alta resistência a altas temperaturas torna-o ideal para sistemas onde a temperatura pode atingir altos níveis. O composto GaAs é também popular em aplicações espaciais onde é necessária uma forte resistência a danos por radiação e alto rendimento das células. Uma desvantagem é naturalmente o seu custo.

## 2.4- Células PV e o futuro – enquadramento em I&D

O mercado PV é dominado por células solares de materiais cristalinos de silício, mas com várias tecnologias de películas finas a ganharem protagonismo e posição neste mercado [1]. Tanto as células solares de silício cristalino e as tradicionais tecnologias de películas finas centram-se na investigação com o objectivo de reduzir a relação custo/Wp<sup>5</sup>. No entanto, limitar esta investigação só a este nível pode ser comprometedor para o futuro dos PV.

Uma variedade de novas tecnologias fotovoltaicas e conceitos de conversão são alvo de grande interesse de investigação em todo o mundo. Os objectivos consistem sempre na redução de custos, altos desempenhos/rendimentos ou uma combinação dos dois.

---

<sup>5</sup> Wp – Definição para o inglês *Watt peak* (potência de pico).

Um dos pontos-chave é sem dúvida, do custo dos módulos PV é a redução do custo a nível de processo de fabrico usado. Neste contexto, é bastante interessante a substituição num futuro próximo de camadas com semicondutores mono-cristalinos e poli-cristalinos por camadas nano estruturadas.

As novas tecnologias podem ser caracterizadas por:

- Opções com o principal objectivo de reduzir bastante o custo, enquanto optimizam a eficiência
  - Células de óxido sintetizadas;
  - Células solares orgânicas;
  - Outros materiais nano-estruturados.
- Opções com o principal objectivo de aumentar bastante a eficiência, enquanto optimizam o custo
  - Células de junção múltipla para uso em concentradores
  - Conceitos de conversão inovadores

Estas novas tecnologias estão em vários patamares de investigação desde a “prova de princípio” (física ou química) à produção de protótipos. Muitas ainda necessitam de investigação fundamental para mostrar o seu potencial a nível de uso comercial. Podemos definir estas inovações de tecnologias em dois tipos: tecnologias emergentes e tecnologias novas.

#### **2.4.1- Tecnologias emergentes**

Estas tecnologias referem-se a tecnologias que já ultrapassaram a fase de “prova de princípio” e que podem ser consideradas opções a longo prazo, que irão competir directamente com as células de tecnologias já conhecidas – silício cristalino e película de filme.

No que diz respeito à posição europeia em relação a estas tecnologias, existe um forte investimento, e começam a ser dados os primeiros passos para comercialização de algumas delas. Podemos dividir estas tecnologias emergentes em três subcategorias, todas elas focadas na produção em custo reduzido com eficiências aproximadas de 15% [11].

#### *2.4.1.1 – Tecnologias avançadas de película fina inorgânicas*

Este tipo de tecnologia emergente tem as suas origens nas tecnologias de película fina, mas os conceitos relativos a substratos, tecnologia de depósito e fabrico de módulos divergem um pouco dos conceitos falados anteriormente relativo à tecnologia de película fina (Cf. capítulo 2.2.1). Um exemplo desta tecnologia avançada é a abordagem CIS<sup>6</sup> esférica. Nesta tecnologia, esferas de vidro (disruptivo quando comparado com os substratos actuais de vidro) são cobertas com uma camada fina de composto poli-cristalino e o seu processo de interligação entre as células esféricas é bastante diferente do módulo tipicamente usado.

Outro exemplo é a película fina de poli-silício, onde a camada de silício poli-cristalino é fabricada a altas temperaturas não usadas normalmente para fabrico do silício amorfo ou mesmo silício microcristalino (Figura 14).

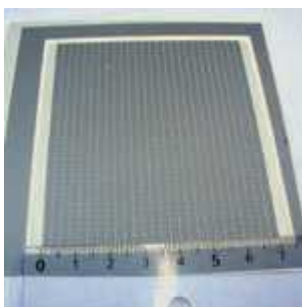


Figura 14 – Módulo de célula solar de silício poli-cristalino.

O depósito a altas temperaturas permite taxas maiores de depósito e aumentar a qualidade das camadas de silício activo. A alta qualidade da electrónica deverá resultar em resultados (a nível laboratorial) de eficiências por volta de 15% nos próximos 5 anos [11].

No entanto, o equipamento usado para depósito do silício poli-cristalino a temperaturas acima de ~~600°C~~ está ainda numa fase inicial, e um desenvolvimento de cerâmicas adequadas e substratos de vidro a altas temperaturas é ainda necessário para explorar o verdadeiro potencial desta tecnologia.

#### *2.4.1.2 – Células solares orgânicas*

Nesta subcategoria, a camada activa na sua configuração possui pelo menos uma parte parcial de um corante orgânico moléculas orgânicas, moléculas orgânicas voláteis ou polímeros adequados para o processamento líquido. As células solares orgânicas têm sido tema bastante importante no que diz respeito a actividades I&D desde há algum tempo,

---

<sup>6</sup> Composto semiconductor poli-cristalino de cobre, índio e selénio (cf. Capítulo 2.2.1.2)

porque oferecem boas perspectivas futuras de custos muito baixos do material da camada activa, substratos de baixo custo e baixa energia de entrada. Os módulos de células solares desta tecnologia podem custar menos de 0.5 € / Wp.

A emergência de células solares orgânicas tem sido facilitada pelos conceitos de célula que são radicalmente diferentes das células solares de junção homogénea e heterogénea actualmente produzidas. A base destes conceitos é a existência de domínios nano sintetizados resultando numa interface distribuída aumentando a taxa de dissociação de excitação e desse modo também aumentar a colecção de transportadores fotogerados.

Dentro das células orgânicas solares existem duas metodologias. A primeira é a abordagem híbrida onde as células solares orgânicas retêm um componente inorgânico <sup>7</sup>. A segunda é a abordagem totalmente orgânica <sup>8</sup>. Os grandes desafios para ambas as abordagens são basicamente o aumento da eficiência, melhoramento da estabilidade e o desenvolvimento de uma tecnologia de fabrico adaptável. A eficiência de estes dispositivos deverá ser aumentada para 10% com um objectivo de 15 % em laboratório por volta de 2015 [11]. O aumento de desempenho das células solares orgânicas requer um melhoramento no conhecimento básico da física do dispositivo, a síntese de novos materiais e o desenvolvimento de conceitos de célula avançado (multi-junção ou abordagens não planas).

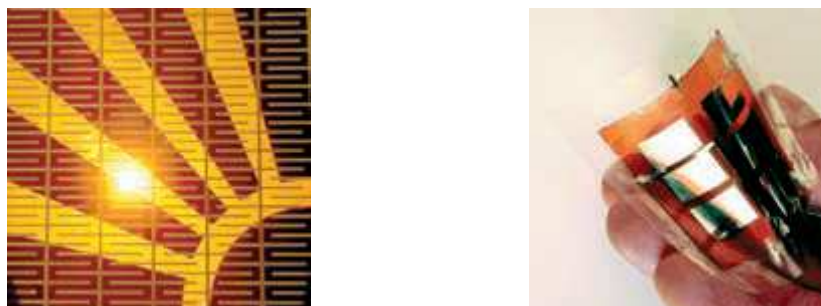


Figura 15 – Módulo de célula solar sensibilizado por corantes (*dye-sensitised*) nano-cristalino; Célula solar orgânica de heterojunção.

#### 2.4.1.2 – Termo-fotovoltaicos (TPV)

A longo prazo, esta tecnologia poderá ser usada em aplicações de concentração de energia solar (CSP). Na Europa existem vários tipos de células de lacuna de banda <sup>9</sup> baixa (*low-band gap cell*) sendo investigadas para TPV, desde células baseadas em germânio a ligas ternárias e quaternárias incorporando gálio, antimónio, índio, arsénico e alumínio. Embora seja necessário algum I&D nos componentes individuais de um sistema TPV (célula, módulo monolítico de integração, emissor, filtros), os principais desafios é a integração destes

<sup>7</sup> Por exemplo a célula de Graetzel (Figura 15)

<sup>8</sup> Por exemplo a célula solar de junção heterogénea aceitador-doador (Figura 15)

<sup>9</sup> Lacuna de banda ou lacuna na banda de valência (Do inglês *band-gap*) nos semicondutores, a lacuna de banda geralmente refere-se à diferença de energia (em Volt electrão) entre topo da banda de valência e final da banda de condução; é a quantidade de energia necessária para libertar um electrão de valência da sua orbita à volta do núcleo.

componentes num sistema, aumento da fiabilidade e o demonstrar de custos de electricidade menores a 0,1 €/kWh e uma eficiência de sistema de 15% (Figura 16) [11].

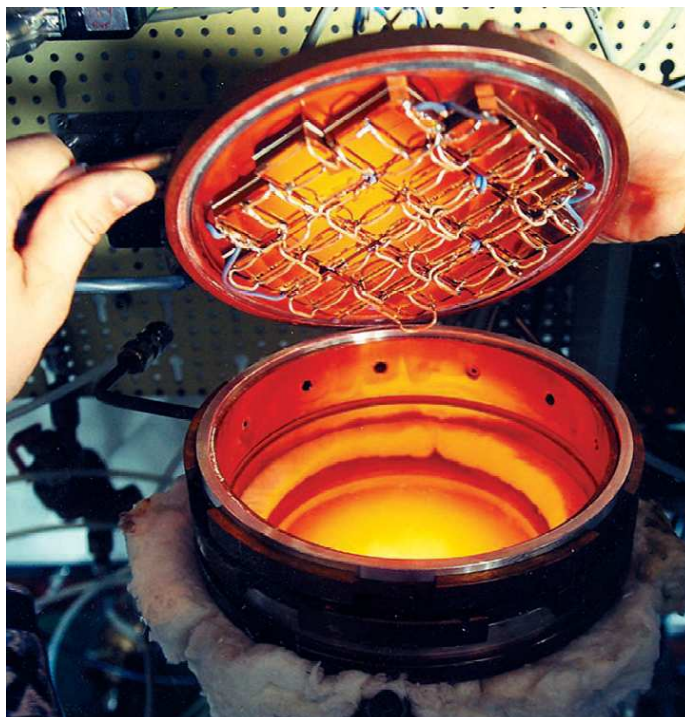


Figura 16 – Possível implementação de célula solar de lacuna de banda baixa.

## 2.4.2- Tecnologias inovadoras

As tecnologias de PV nesta categoria podem ser caracterizadas em termos de abordagem de altas eficiências. Dentro desta categoria é feita a distinção entre abordagens que melhoram as propriedades da camada activa para melhorar aproveitar o espectro solar, e as abordagens que modificam o espectro solar incidente e funcionam na periferia do dispositivo activo, sem modificar as propriedades da camada activa. Os avanços na nano tecnologia e nano materiais é bastante relevante para ambas as abordagens.

### 2.4.2.1- Camadas activas inovadoras

A nano tecnologia permite que características com dimensionalidade reduzida sejam introduzidas na camada activa: poços quânticos, arames quânticos e pontos quânticos. Existem três abordagens usando estas características.

A primeira visa obter uma combinação mais favorável da corrente de saída e da tensão do dispositivo. Ambos os parâmetros estão relacionados com a lacuna de banda do



semicondutor usado, mas com dependência oposta. Ao introduzir poços quânticos ou pontos quânticos constituído por um semicondutor de lacunas banda baixa (*low-band gap*) dentro de um semicondutor “hospedeiro” com lacuna de banda maiores, a corrente poderá ser aumentada enquanto retêm (parte da) a alta tensão de saída do semicondutor “hospedeiro”.

A segunda abordagem baseia-se no uso de efeito de limitação quântica para obter um material com uma lacuna de banda maior.

A terceira abordagem baseia-se na colecção de transportadores excitados antes de estes termalizarem<sup>10</sup> para final da banda de energia em questão (exemplo: células de transportadores quentes - *hot carrier cells*). A reduzida dimensionalidade dos materiais de pontos quânticos visa a redução do número modos de fonões<sup>11</sup> disponíveis, em qual a termalização toma lugar e aumenta a probabilidade de colheita da energia total do transportador excitado. Diversos grupos na Europa têm ganho protagonismo no crescimento, caracterização e aplicação destas nano estruturas em várias estruturas (Si, Ge). Em termos de I&D pioneiros em novos conceitos para longo prazo temos o exemplo da célula solar de banda metálica intermédia (Figura 17 e 18) [11].

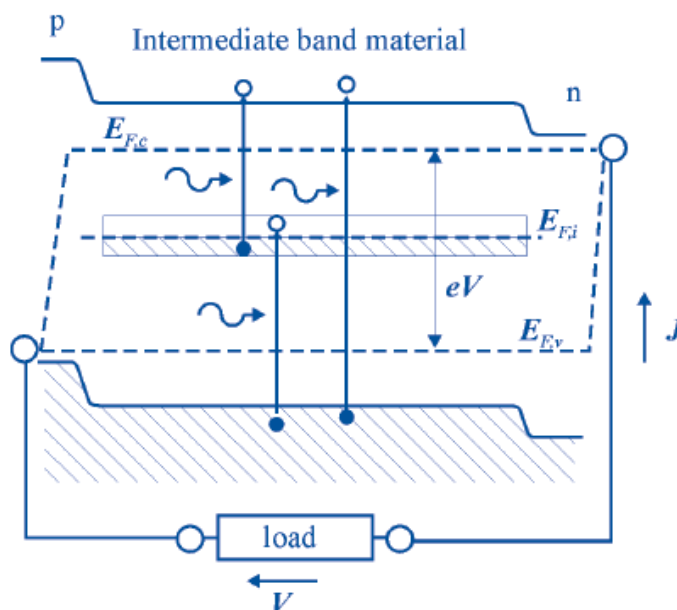


Figura 17 – Estrutura da banda de uma célula solar de banda intermédia, mostrando lacunas transitórias de energia e níveis “quasi-Fermi” (Fonte: Polytechnical University of Madrid)

<sup>10</sup> Termalizar - processo em qual os neutrões perdem energia num mediador e tornam-se neutrões térmicos.

<sup>11</sup> Fonão – Um **fonão**, na física da matéria condensada é uma quase-partícula que designa um quantum de vibração em um retículo cristalino rígido. O nome fonão deriva do grego *phone* (φωνη), que significa som, voz.



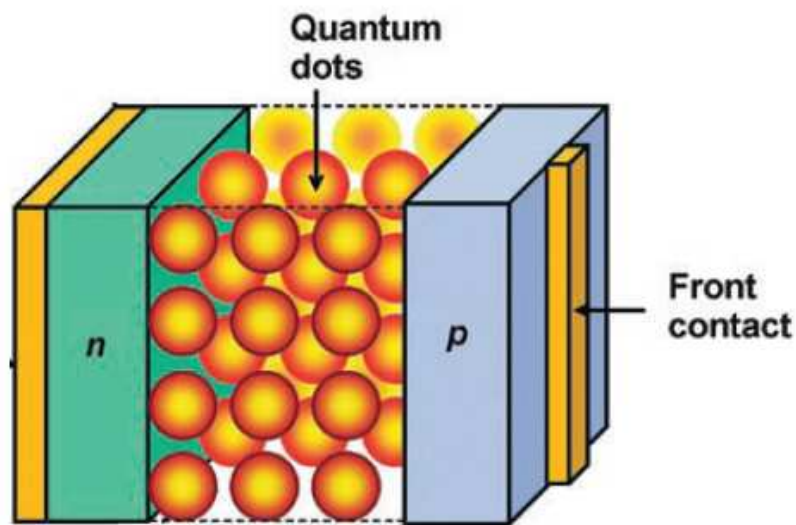


Figura 18 – Estrutura da camada da célula solar de banda intermédia usando pontos quânticos (Fonte: Polytechnical University of Madrid)

O esforço de investigação destas abordagens dão prioridade ao desenvolvimento de materiais básicos, caracterização optoelectrónica e morfológicas avançadas, e o desenvolvimento de modelos que predizem o comportamento e o desempenho da célula quando iluminada. Os limites teóricos em termos de eficiência destes dispositivos podem ir até 50-60% [11]. O desenvolvimento de camadas activas inovadoras deverá ser feito com interesse também no desenvolvimento de sistemas concentradores (falaremos deste tipo de sistemas mais à frente), desde que é muito provável que esta tecnologia terá melhores resultados sobre altas intensidades de iluminação.

#### 2.4.2.2- Acondicionamento do espectro solar para impulsionar tecnologias de células existentes

Acondicionando o espectro solar que é recebido nas células para máxima conversão dessa energia para electricidade na camada activa do semiconductor invoca conversões “up” e “down” e efeitos plasmónicos. A nano tecnologia poderá também ter um papel importante. “Plasmons”<sup>12</sup> de superfícies geradas através da interacção entre fotões e nano partículas metálicas foram propostas, com o objectivo de aumentar a eficiência da fotoconversão em células através do deslocamento do comprimento de onda da luz incidente para os comprimentos de onda onde a eficiência de colecção é máxima ou através do aumento da absorção da intensidade de campo local.

<sup>12</sup> “Plasmon”(do inglês) - É um quântico de oscilação de plasma.

A aplicação de tais efeitos nos PV está ainda num nível bastante inicial, mas o facto que esta tecnologia poderá ser adicionada a tecnologias convencionais de células solares (silício cristalino e películas finas). É esperado um melhoramento a nível de desempenho de cerca 10% na próxima década nas tecnologias células solares tipicamente usadas, se aplicados estes métodos [11].

Os grandes benefícios serão obtidos pela combinação de modificações da camada activa com modificações nas componentes periféricas da célula.

#### 2.4.1- Tecnologias por Concentrador (CPV<sup>13</sup>)

A ideia consiste na concentração de luz solar num ponto para melhor aproveitar o aproveitamento de energia. O princípio básico é mostrado na figura 19.

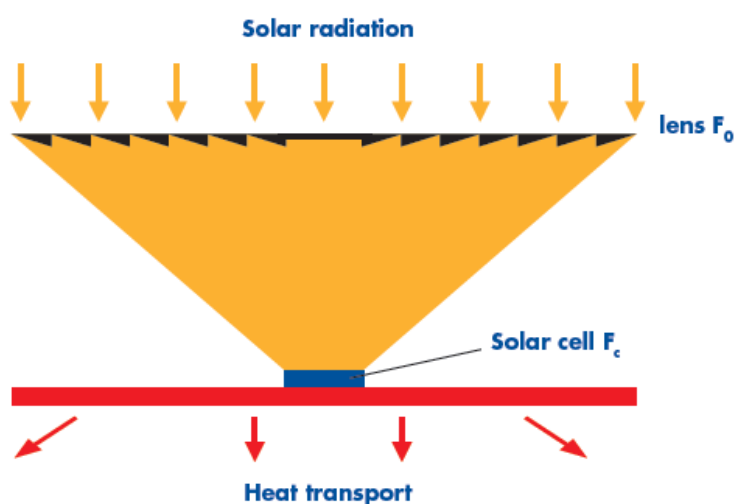


Figura 19 – Princípio de funcionamento de um concentrador PV. Neste caso uma lente “Fresnel”(F<sub>0</sub>) é usada para concentrar a luz solar numa célula solar pequena (F<sub>c</sub>).

Concentrando a luz solar através de dispositivos ópticos, como lentes (F<sub>0</sub> na figura) ou espelhos a área da célula solar (F<sub>c</sub> na figura) é menos dispendiosa e reduzida, e aumenta a sua eficiência. Os sistemas CP dependem do feixe de irradiação e da necessidade de seguir o movimento do Sol no céu através do movimento do sistema.

A grande vantagem desta tecnologia é a possibilidade de alcançar eficiências de sistema para além de 30%, as quais não podem ser atingidas em tecnologias de junção simples não concentradas.

Apesar de falarmos das tecnologias por concentrador no capítulo de PV futuros, esta técnica pode ser incluída em todas as gerações PV. A empresa “Sandia Labs” (Norte-

<sup>13</sup> CPV- Concentrador fotovoltaico (Do inglês *Concentrator Photovoltaic*)

Americana) foi a primeira a desenvolver um sistema de concentrador nos anos 70. Baseava-se num sistema de 1kWp com uma eficiência de 12,7% numa concentração de 50 sóis [11].

Menos de 1MWp/ano de capacidade de produção de sistemas CPV existe actualmente, mas ao longo dos anos tem havido empresas que entraram neste mercado. As principais razões para este interesse na tecnologia são:

- Aplicações fotovoltaicas têm crescido em escalas que podem ser aplicadas em termos de “fábricas PV”
- A existência de células solares com compostos semicondutores que permitem atingir eficiências de 35% e num futuro de talvez 40% ou mais [11].

### 3 – Enquadramento I&D da energia fotovoltaica

A inovação no que diz respeito à energia fotovoltaica (PV) é relativamente importante, na medida em que a sua redução de custo e o aumento da sua eficiência, tornaria esta fonte de energia extremamente competitiva. Permitindo combater a ameaça de alterações climáticas, bem como aumentar a segurança no que ao fornecimento de energia diz respeito.

A União Europeia (UE) financia investigações na energia fotovoltaica desde 1970, contribuindo para a maioria das melhorias de desempenho. No âmbito do actual Programa-Quadro (PQ<sup>14</sup>) de investigação, a UE tem suportado e financiado a maioria das iniciativas, cujo objectivo passa por reduzir custos dos módulos fotovoltaicos, desenvolver novos materiais e promover a disseminação e penetração da energia fotovoltaica no mercado global.

A tecnologia fotovoltaica apresenta um papel fundamental na transição para um fornecimento de energia sustentável no séc. XXI.

Apesar de o uso de energia fotovoltaica tenha aumentado significativamente nos últimos anos, representa ainda uma pequena porção entre as restantes energias renováveis; Sendo o custo dos módulos fotovoltaicos, a principal causa.

De acordo com o conselho consultivo *Photovoltaic Technology Research Advisory Council* (PV-TRAC), é esperado que a energia PV gere 4% da energia total existente em 2030. Número este, que pode e é esperado que incremente continuamente, dado o seu potencial esperado em larga escala a um preço competitivo [1]. Este potencial deve-se sobretudo ao esperado aumento na eficiência do módulo, células e sistemas PV, bem como aumento da sua longevidade, fazendo uso de novos materiais. Como tal é esperado que os preços decresçam significativamente contribuindo desta maneira para a sua crescente competitividade.

O uso de recursos fósseis tem que ser substituído por recursos naturais renováveis, de forma a garantir a sustentabilidade no fornecimento de energia e de forma a reduzir a emissão de gases resultantes do uso de combustíveis fósseis.

A próxima década é considerada como decisiva, no que diz respeito aos países/zonas que dominarão o sector da energia PV, pelo que a UE e os países constituintes, devido à sua boa tecnologia e posição no mercado actual, tem todo o interesse em incentivar financeiramente e socialmente a investigação e o desenvolvimento (I&D<sup>15</sup>), condições imprescindíveis para o sucesso da energia PV.

---

<sup>14</sup> PQ – Iniciais de Programa-Quadro da União Europeia (FP - *Framework Programme*).

<sup>15</sup> I&D – Iniciais para Investigação e Desenvolvimento (R&D – *Research and Development*).

### 3.1 – Agenda internacional

Um recurso energético limpo e livre de combustíveis como é a energia fotovoltaica, tem o potencial para criar uma situação económica e política estável, daí a importância da mesma para o nosso futuro.

Combater as alterações climáticas é o maior desafio actual e de todos os tempos. Em 1992, a *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCC) estabeleceu a redução de emissão de gases de efeito de estufa para metade como a meta a atingir.

O protocolo de Quioto é considerado como o primeiro passo para contribuir na implementação da UNFCC. Foi estipulado um decréscimo de 5,2% de gases de efeito de estufa por países industrializados entre 1990 e 2008-2012. No entanto a meta para a UE situa-se nos 8% [1].

Nos países em desenvolvimento, a energia é considerada como a chave para o seu desenvolvimento, seja na área da saúde, educação, bem como na área de crescimento financeiro, sendo que os sistemas fotovoltaicos autónomos serão preferenciais nas áreas rurais e em desenvolvimento. O estado actual da energia fotovoltaica nestes países é caracterizado por um mercado rural isolado, financiados por entidades bancárias em desenvolvimento, agências nacionais e internacionais através do desenvolvimento e projectos de cooperação.

Em 1997, a comissão Europeia considerou os 3 GWp de capacidade dos sistemas fotovoltaicos, como a meta a atingir até 2010, sendo que é estimado que essa capacidade atinja os 5 GWp (resultado de incentivos mercantis na Alemanha). Espera-se que se atinja os 200 GWp até 2030 na UE de entre os estimados 1000 GWp em todo o Mundo [12].

A indústria fotovoltaica europeia compete essencialmente com empresas asiáticas e americanas, sendo que o Japão e a China possuem programas institucionais para suportar as suas indústrias. Devido a um plano de longa duração, planos de suporte, investimentos de segurança e um forte mercado doméstico, a indústria fotovoltaica japonesa possui cerca de 50% de quota de mercado de produtos fotovoltaicos [11]. O Japão pretende atingir os 5 GWp até 2010 e entre 50-200 GWp até 2030 [13].

China é o segundo país com uma estratégia industrial com o intuito de obter uma indústria fotovoltaica extremamente competitiva. As células e módulos chineses estão a obter uma significativa parte da quota de mercado e a sua capacidade de produção é imbatível.

#### 3.1.1 – Japão

No Japão, o fornecimento de energia primária nos anos 60 era fortemente dependente do petróleo importado, representando 80% de todo o fornecimento de energia. A primeira crise de petróleo aconteceu em 1973, levando à implementação de um novo programa de I&D

de recursos energéticos alternativos ao petróleo chamado de “Sunshine Project” [23]. A tecnologia fotovoltaica foi sem dúvida uma das grandes preocupações em investimento I&D, e em 1978 outro projecto é iniciado para tecnologias de conservação energética, intitulado “Moonlight Project”. Em resposta às preocupações a nível ambiental, em 1989 é iniciado outro projecto em tecnologias ambientais globais [23].

Estes três projectos atrás mencionados, em 1993 são integrados no programa “New Sunshine Program”, focado no crescimento sustentável e na resolução de questões energéticas e ambientais [23].

Devido à reestruturação do governo japonês em 2000, o “Ministério do Comércio Internacional e Indústria” (MITI<sup>16</sup>) foi reorganizado dando origem ao “Ministério da Economia, Comércio e Indústria” (METI<sup>17</sup>), e a “Agência da Ciência Industrial e Tecnologia” (AIST<sup>18</sup>) foi eliminada. Esta reestruturação resultou no fim do investimento I&D em fotovoltaicos dentro do programa “New Sunshine Program” no relatório “JFY 2000”<sup>19</sup> com óptimos resultados [23].

No relatório “JFY 2001”, a “Nova Organização para o Desenvolvimento da Indústria Tecnológica” (NEDO<sup>20</sup>) estabeleceu um plano de 5 anos em investimento I&D para os fotovoltaicos. Esta organização (NEDO) desenhou vários programas de I&D que visavam tanto o desenvolvimento de tecnologia, com o projecto “Investigação para Tecnologia Fotovoltaica Inovadora”, como I&D para tecnologias à beira da comercialização com os projectos “Desenvolvimento de Tecnologias Avançadas de Manufatura” e “Desenvolvimento de Tecnologia Avançada Prática” [23].

A organização “NEDO” começou a preocupar-se em promover programas que se focassem mais no I&D direccionado para o mercado, onde existia uma colaboração mais unida entre indústria, academia e o governo, desenvolvendo um mercado em maior escala. Como resultado, foi estabelecido o programa “PV Roadmap Toward 2030 (PV2030)” em Junho de 2004. Neste programa, é esperado que até 2030 exista uma formação em grande escala de um mercado para os sistemas de geração fotovoltaica, onde os principais objectos centram-se numa grande melhoria na eficiência económica, e no aumento da área de aplicação dos fotovoltaicos [24].

Na próxima figura é possível observarmos vários projectos da organização “NEDO” iniciados em 2006, tal como projectos antigos relacionados. Os dois novos projectos são “I&D para Sistemas PV da próxima Geração”<sup>21</sup> e “Tecnologia de Sistemas PV para Implementação em massa, Fase II”<sup>22</sup> [24].

---

<sup>16</sup> MITI – Do inglês “Ministry of International Trade and Industry”

<sup>17</sup> METI – Do inglês “Ministry of Economy, Trade and Industry”

<sup>18</sup> AIST – Do inglês “Agency of Industrial Science and Technology”

<sup>19</sup> JFY – Do inglês “Joint Research Report”

<sup>20</sup> NEDO – Do inglês “New Energy and Industrial Technology Development Organization”

<sup>21</sup> Do inglês “R&D for Next Generation PV Systems”

<sup>22</sup> Do inglês “PV System Technology for Mass Deployment, Phase II”.

## Overview of PV R&D Projects

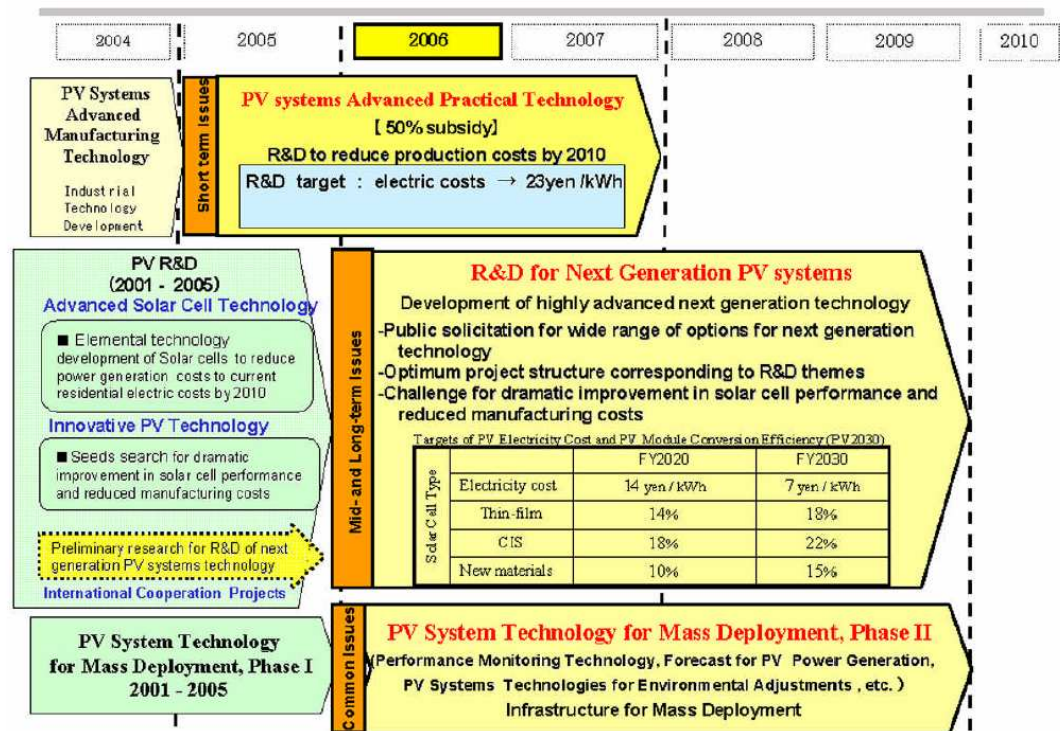


Figura 20 - Visão global de projectos I&D em PV no Japão [25]

O projecto “I&D para Sistemas PV da próxima Geração” tem como foco uma perspectiva a médio/longo prazo e inclui o desenvolvimento de novos, tipos pioneiros de células solares e inovações tecnológicas além do aumento das tecnologias existentes. Em mais detalhe, este projecto visa a inovação nas seguintes tecnologias:

- Células solares CIS de película fina

Objectivos em termos de eficiência: 18% para áreas de módulo de  $100\text{cm}^2$ ,  
16% para áreas de módulo de  $900\text{cm}^2$ .

Desenvolvimento de tecnologias de produção de células em substratos leves.

- Células solares de silício de película fina

Objectivos em termos de eficiência: 15% para áreas de módulo de  $1000\text{cm}^2$   
(taxa de depósito de película: 2.5 nm/s).

Conclusão de investigação elemental da produção de módulos em área de ultra/larga escala ( $4\text{m}^2$ ).

- Células solares sensibilizados por corantes (*Dye-sensitized*)

Desenvolvimento desta tecnologia a baixo custo, alto tempo de vida, e áreas grandes ( $900\text{cm}^2$ ) com eficiências de 8%.

Objectivos em termos de eficiência: 15% para células de áreas pequenas ( $1\text{cm}^2$ ).

- Células solares de silício cristalino ultra-fino

Desenvolvimento em tecnologia de produção para células solares de silício com espessura de substrato de 100  $\mu\text{m}$ .

- Células solares de película fina orgânicas

Objectivos em termos de eficiência: 7% para áreas pequenas (1  $\text{cm}^2$ )  
Melhoramentos na fiabilidade sob as condições reais de funcionamento. ~

- Pesquisa para tecnologias pioneiras

Por exemplo: tecnologia de produção de material de ultra baixo custo, células de ultra alta eficiência, novos conceitos de células solares.

Os temas e conteúdos do projecto “Tecnologia de Sistemas PV para Implementação em massa, Fase II” são os seguintes:

- 1- I&D para avaliar tecnologias de monitorização de desempenhos para células/módulos

Células solares:

- Alta eficiência/Novos tipos de tecnologia de monitorização de desempenhos
- Tecnologia precisa de medição nos módulos
- Módulos de grandes áreas (por exemplo 2m x 1.5m)

Tecnologia de desempenho de produção em PV

Compilar os dados do clima para aceder a uma produção consistente e a uma tecnologia de avaliação interna.

Fiabilidade

Desenvolvimento de métodos de teste para reunir e analisar dados e avaliar durabilidades.

- 2- Desenvolvimento de uma tecnologia PV ambiental

- Estabelecer condições ambientais necessárias e directrizes tecnológicas para a instalação de PV em vários ambientes
- Desenvolvimento de tecnologias relacionadas com “reduzir”, “reutilizar” e “reciclar”, e avaliação do ciclo de vida.

- 3- Investigação das tendências de I&D em PV e promoção de cooperação internacional



Conhecimento das tendências do I&D global e projectos nacionais através da investigação, análise, etc., e compilação das tendências de I&D.

Vários são os projectos incluídos nestes programas onde várias empresas trabalham nos mesmos, e a descrição destes podem ser encontrados no site da própria organização NEDO (<http://www.nedo.go.jp/english/index.html>). De seguida encontram-se alguns exemplos desses projectos, no campo dos Fotovoltaicos [26]:

1- Projecto de teste no campo em Novas Tecnologias de geração de energia (FY2007-FY2014 – Trabalho de instalação para estar completo no ano fiscal FY2010; FY2008 Orçamento de projecto: 6.33 biliões de Yen<sup>23</sup> = 46.35 milhões de euros)

| Approved PV projects |                    |                     |
|----------------------|--------------------|---------------------|
| Fiscal year          | Number of projects | Generation capacity |
| FY2003               | 148                | 4,480 kW            |
| FY2004               | 262                | 7,161 kW            |
| FY2005               | 457                | 17,709 kW           |
| FY2006               | 662                | 22,080 kW           |
| FY2007               | 353                | 20,413 kW           |

Figura 21 - Projectos aprovados para Novas tecnologias de geração de energia

2- Desenvolvimento de Tecnologias para acelerar as aplicações práticas de sistemas PV de geração de energia

(FY2008-FY2009; FY2008 Orçamento de Projecto: 200 milhões de Yen = 1.46 milhões de Euros)

3- I&D de próximas gerações de tecnologias de sistemas de geração PV

(FY2006-FY2009; FY2008 Orçamento de Projecto: 1.10 biliões de Yen = 8.05 milhões de Euros)

4- I&D em células solares inovadoras (Centro Internacional de Investigação para o Programa de células solares inovadoras)

(FY2008-FY2014; FY2008 Orçamento de projecto: 2.00 bilhões de Yen =14.64 milhões de Euros)

5- I&D em Tecnologias fundamentais comuns para Sistemas PV de geração

(FY2006-FY2009; FY2008 Orçamento de Projecto: 400 milhões de Yen = 2.93 milhões de Euros)

<sup>23</sup> Yen Japonês – é a moeda do Japão (1 Yen Japonês = 0.00732222616 Euros)

### 3.1.2 - Estados Unidos da América

Os Estados Unidos da América sempre se mostraram interessados em investir nas tecnologias fotovoltaicas como uma energia amiga do ambiente, e muitas foram as iniciativas governamentais que visaram esse propósito.

Em Junho de 1997, num discurso antes de uma sessão das Nações Unidas sobre o Ambiente e Desenvolvimento, o Presidente Clinton anuncia uma iniciativa para a instalação de sistemas de energia solar em 1 milhão de dólares (U.S.) construídos até 2010. O programa “Million Solar roofs” levado a cabo pelo Departamento de Energia dos E.U. (DOE<sup>24</sup>) representa um sério compromisso do governo dos E.U.A. para promover as tecnologias solares [21].

Quando a iniciativa começou, cerca de 2000 edifícios estavam a utilizar tecnologias solares. No ano 2000, perto 11000 sistemas solares termais e fotovoltaicos foram instalados [21].

A indústria fotovoltaica nos Estados Unidos não está á espera para que o governo tome a iniciativa de investir. Num encontro de toda a indústria experiente em desenvolvimento e fabrico de PV em 1999, deu-se o primeiro passo em identificar as necessidades de investigação para a indústria, dando origem ao relatório/roteiro “PV Industry Roadmap” [21].

Este roteiro foi publicado em 2000, definindo 4 principais objectivos para os próximos 20 ano. O roteiro criou um desenho técnico de prioridades necessárias em investigação, tecnologia, e mercado para alcançar os objectivos a longo prazo na indústria de PV. O roteiro definiu assim 4 objectivos principais para a indústria:

- Manter a liderança dos E.U. na tecnologia mundial na indústria;
- Alcançar competitividade económica com tecnologias convencionais;
- Manter um mercado sustentável e um crescimento de produção de PV;
- Fazer da indústria PV uma indústria rentável e atractiva para investidores.

Especificamente, a indústria dos E.U. pretende instalar 6 gigawatts de pico (GWp) a nível mundial, e baixar o custo para o usuário final para os \$ 3 (Dólares Americanos) por Watt AC em 2010 e alcançar \$1.50 por Watt AC em 2020 [21].

---

<sup>24</sup> DOE- Do inglês “Department of Energy”

De acordo com a “Agência de Informação Energética”<sup>25</sup>, 770 kilowatts pico de células solares e módulos foram enviados por navio em 1999, representando um aumento de 52% na produção em relação ao ano anterior. Embora 72% deste valor fosse exportado, um aumento de 75% nos fotovoltaicos conectados à rede foi também registado nos Estados Unidos. O preço das células e módulos também baixou de 1998 para 1999 [21].

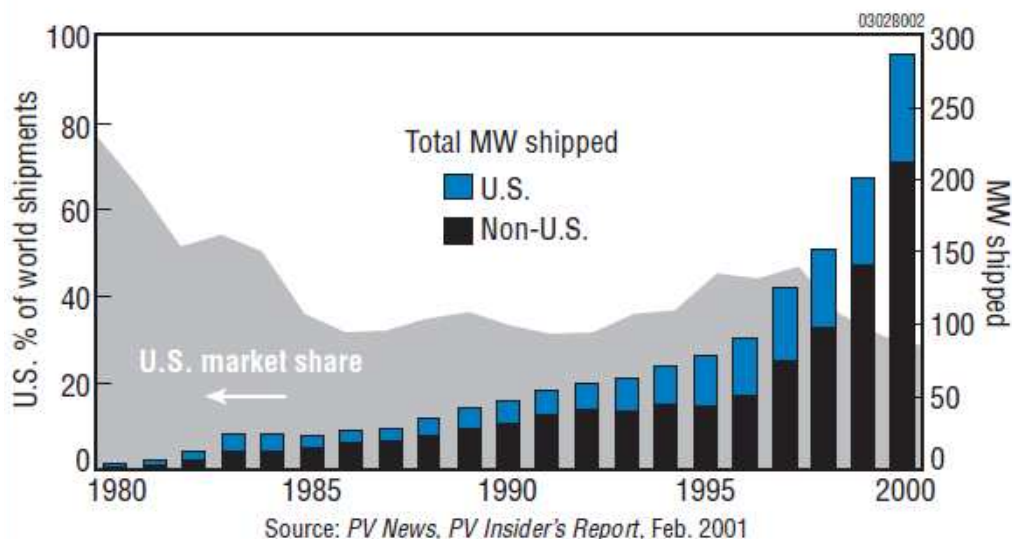


Figura 22- Total de megawatts enviados por navio pelos E.U e outros

Em 1990, os E.U. produziram 14.8 megawatts (MW) de potência em fotovoltaicos. No ano 2000, este número chegou a 78.5 megawatts, havendo um aumento de cinco vezes mais em 10 anos. Em comparação com o Japão, este país subiu de 16.8 para 116.7 megawatts (MW) [21].

Para atingir o principal objectivo de instalar 6 GWp de potência mundial até ao ano 2020, vai ser necessário que haja um aumento bastante significativo [21].

Uma das instituições de grande investimento nos Estados Unidos é o “Laboratório Nacional de Energia Renovável ” (NREL<sup>26</sup>) que representa o laboratório principal para energias renováveis na área de investigação e desenvolvimento (I&D) da eficiência energética. Este laboratório centra-se no avanço do “Departamento de Energia” e nos objectivos energéticos dos E.U.A..

Uma parte importante do programa de PV da NREL centra-se na investigação feita com parcerias com universidades e a indústria. Muitas dessas parcerias podem ser encontradas no site da própria instituição [22].

Vária investigação e desenvolvimento (I&D) está a ser feita nos Estados Unidos no campo dos fotovoltaicos dentro do Programa de Tecnologia de Energia Solar no Departamento de Energia (DOE) e dentro das várias áreas nos laboratórios nacionais, destacando-se o laboratório nacional “NREL”:

<sup>25</sup> Do inglês “Energy Information Agency”

<sup>26</sup> NREL – Do Inglês “National Renewable Energy Laboratory”

- Projecto de fotovoltaicos de alto-desempenho  
([http://www.nrel.gov/pv/high\\_performance\\_pv.html](http://www.nrel.gov/pv/high_performance_pv.html))
- Investigação fotovoltaica (NREL)  
(<http://www.nrel.gov/pv/>)
- Programa de Investigação Solar (NREL)  
(<http://www.nrel.gov/solar/>)
- Fotovoltaicos integrados em edifícios (NREL)  
([http://www.nrel.gov/pv/building\\_integrated\\_pv.html](http://www.nrel.gov/pv/building_integrated_pv.html))
- Medições e Caracterização (“NREL”)  
(<http://www.nrel.gov/pv/measurements/>)
- Desempenho e fiabilidade em I&D (NREL)  
([http://www.nrel.gov/pv/performance\\_reliability/](http://www.nrel.gov/pv/performance_reliability/))
- Materiais de silício e dispositivos (NREL)  
([http://www.nrel.gov/pv/silicon\\_materials\\_devices.html](http://www.nrel.gov/pv/silicon_materials_devices.html))
- Engenharia de Sistemas (NREL)  
([http://www.nrel.gov/pv/systems\\_engineering.html](http://www.nrel.gov/pv/systems_engineering.html))
- Uso de Cádmio em Fotovoltaicos (NREL)  
(<http://www.nrel.gov/pv/cdte/>)
- Projecto I&D de produção de fotovoltaicos do Programa Solar do DOE (NREL)  
([http://www.nrel.gov/pv/pv\\_manufacturing/](http://www.nrel.gov/pv/pv_manufacturing/))
- Parceria de Película fina do Programa Solar do DOE (NREL)  
([http://www.nrel.gov/pv/thin\\_film/](http://www.nrel.gov/pv/thin_film/))

### **3.1.3 – Visão Geral**

Como podemos verificar na seguinte tabela e gráfico associado, o Japão investe significativamente mais fundos públicos no suporte à tecnologia fotovoltaica do que a UE ou EUA. De realçar que muitos dos fundos públicos europeus tem proveniência de diversos programas tecnológicos nacionais, cuja coordenação deixa a desejar, ao contrário do que se passa no EUA ou no Japão.

| (Milhões de Dólares \$) | I&D        | Demonstração | Implantação no mercado | Total      |
|-------------------------|------------|--------------|------------------------|------------|
| Japão                   | 59         | 36           | 185                    | 280        |
| Europa                  | 58         | 11           | 62                     | 131        |
| EUA                     | 35         | 0            | 80                     | 115        |
| Outros Países           | 20         | 9            | 13                     | 42         |
| <b>Total</b>            | <b>172</b> | <b>56</b>    | <b>340</b>             | <b>568</b> |

Tabela 1 – Despesas públicas desde a investigação à implantação no mercado em 2002 (Adaptado de tabela 2 de [1]).

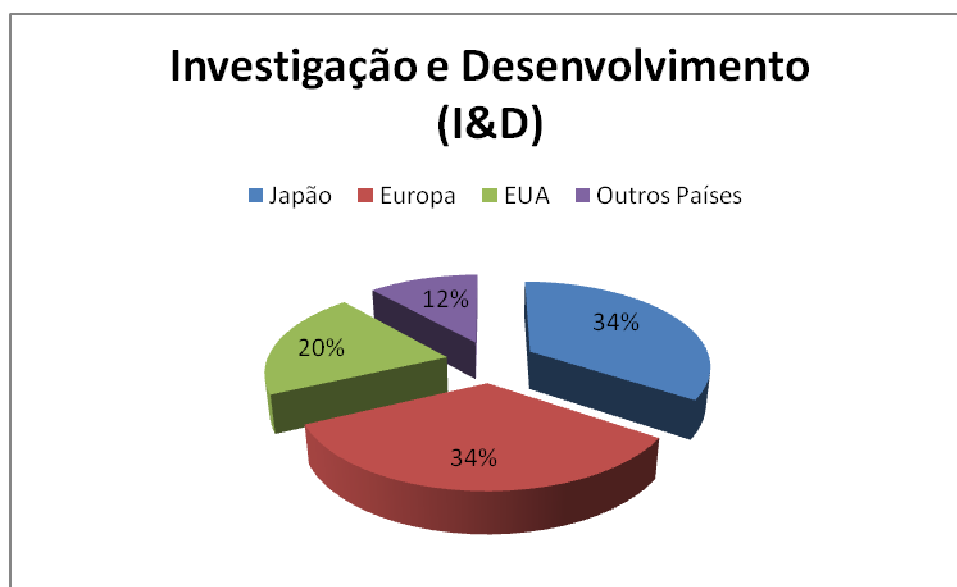


Gráfico 1 - Despesas públicas na investigação e desenvolvimento em 2002 (Adaptado de tabela 2 de [1]).

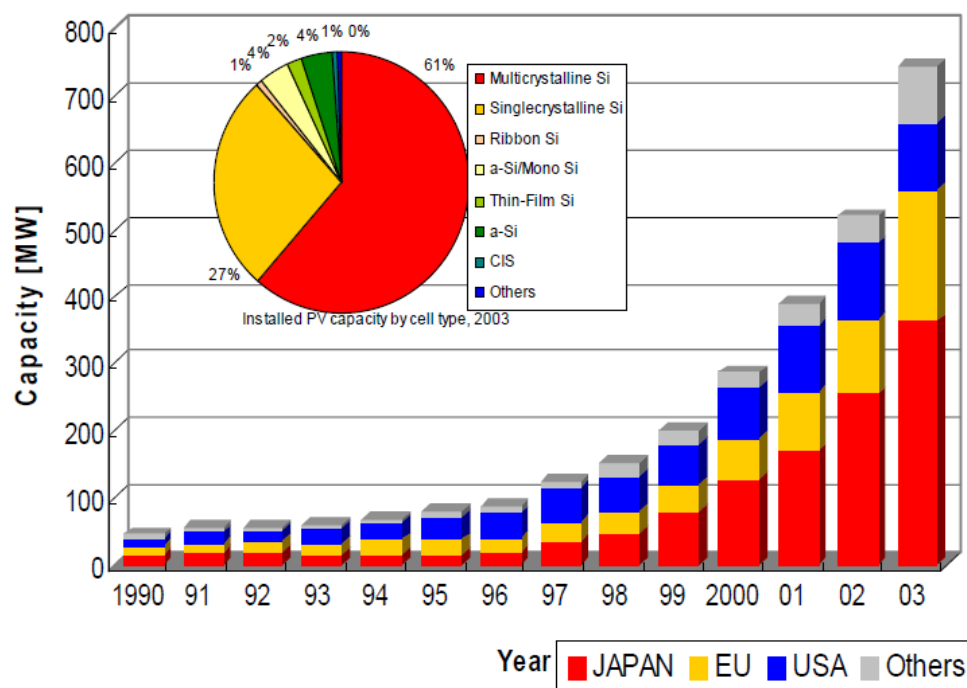


Figura 23 - Capacidade (MW) dos sistemas PV instalados a nível Internacional e capacidade dos PV por tipo de célula

### 3.2. – Agenda europeia

Para combater os desafios definidos anteriormente, impostos pela China e Japão, cabe à Europa fazer um investimento contínuo na pesquisa e desenvolvimento nas aplicações fotovoltaicas, sem descuidar o financiamento e suporte adequado às indústrias de manufatura de produtos fotovoltaicos, com o intuito de aumentar a sua quota de mercado e atingir a liderança neste mercado.

A nível europeu, existe uma série de documentos políticos que promovem e incentivem o uso de energias renováveis, especificamente a energia PV, tais como:

- Livro branco para uma estratégia comunitária e plano de acção, cuja meta a atingir são os 3 GW<sup>27</sup> de capacidade fotovoltaica até 2010 [2].
- Livro verde para uma estratégia europeia para a segurança no fornecimento de energia, cuja meta é duplicar o uso de energias renováveis de 6% em 1996 para 12% em 2010 [3].
- Directiva na produção de electricidade a partir de recursos de energia renováveis, cujo objectivo é aumentar a existência de electricidade verde de 14% para 22% em 2010 [4].

Os objectivos políticos europeus são:

- Aumentar a diversidade de recursos energéticos e segurança no fornecimento de energia para a Europa.
- Reduzir os efeitos para alteração climática.
- Contribuir para um crescimento sustentado económico da economia mundial e dos países em desenvolvimento.
- Desenvolver uma forte secção industrial de alta tecnologia europeia no campo das energias renováveis e assegurar a liderança neste sector a nível mundial.

A situação presente nos vários países europeus é considerada ainda como heterogénea com diferenças significativas nas metas a atingir, e respectivos tempos. No entanto esta diversidade deve ser melhorada a nível de transparência, consistência e eficiência, com o intuito de garantir a estabilização necessária para uma maior segurança no que diz respeito aos investidores e financiadores de projectos.

Na União Europeia as pesquisas relativamente à energia PV é suportada por programas europeus e nacionais, sendo que muitos dos programas existentes relativamente à energia PV iniciou-se em finais da década de 80 ou início da década de 90.

Para alguns estados membros, a energia PV está incluída em programas de energias renováveis, sendo que pode constituir uma prioridade dentro desses programas (como Suécia, Suíça e França) ou não (tal como na Áustria e Dinamarca).

---

<sup>27</sup> GW – GigaWatt (unidade potência).

Nos restantes estados membros, a pesquisa de energia PV incluem-se em programas de desenvolvimento tecnológico. Estas pesquisas podem ser financiadas por programas e entidades específicas, como é o caso do nosso país, em que estas pesquisas são financiadas em parte pela Fundação da Ciência e Tecnologia ou por programas de investimento do Ministério da Economia e Inovação. As entidades governamentais podem estar envolvidas nestes programas tecnológicos, sendo que muitos destes programas são também co-financiados pela UE dentro do Programa-Quadro de I&D.

Alguns estados membros e regiões adoptaram tarifas e outros benefícios fiscais com o intuito de incentivar o uso de energias renováveis, onde se inclui a energia PV.

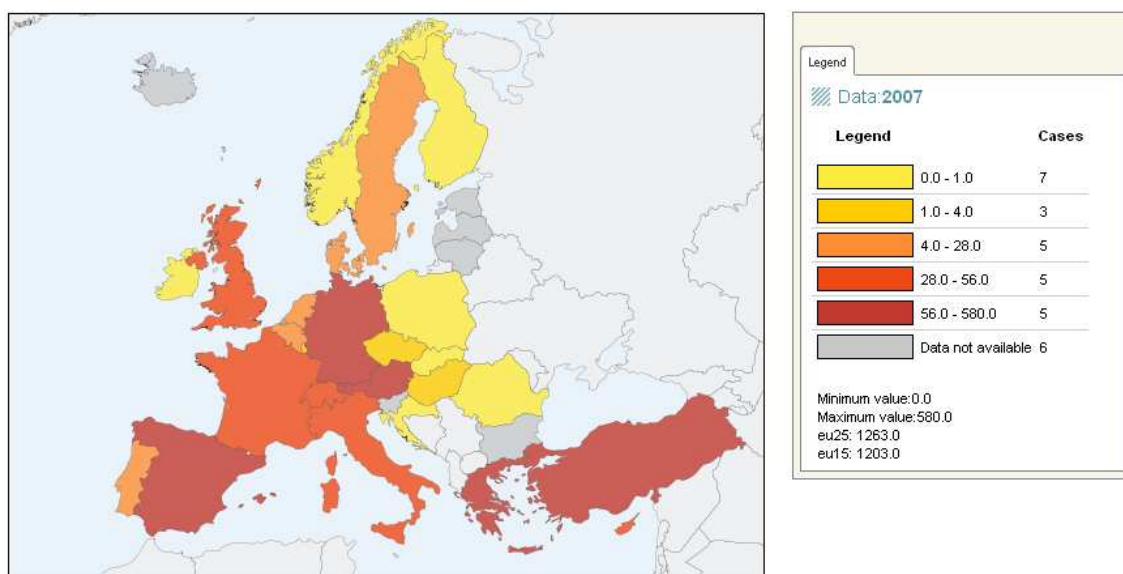


Gráfico 2 – Produção energética europeia de fonte solar em 2007 (1000 toe<sup>28</sup>) (Adaptado de EUROSTAT, 2009).

### 3.3. – Agenda nacional

#### 3.3.1. – Programa Nacional

A promoção de energias renováveis continua a ser uma prioridade do governo, tal como estabelecido no programa nacional estratégico para a energia, sendo que o melhoramento da eficiência, redução de emissão de dióxido de carbono e o aumento de diversidade de energias renováveis são os pontos principais deste programa.

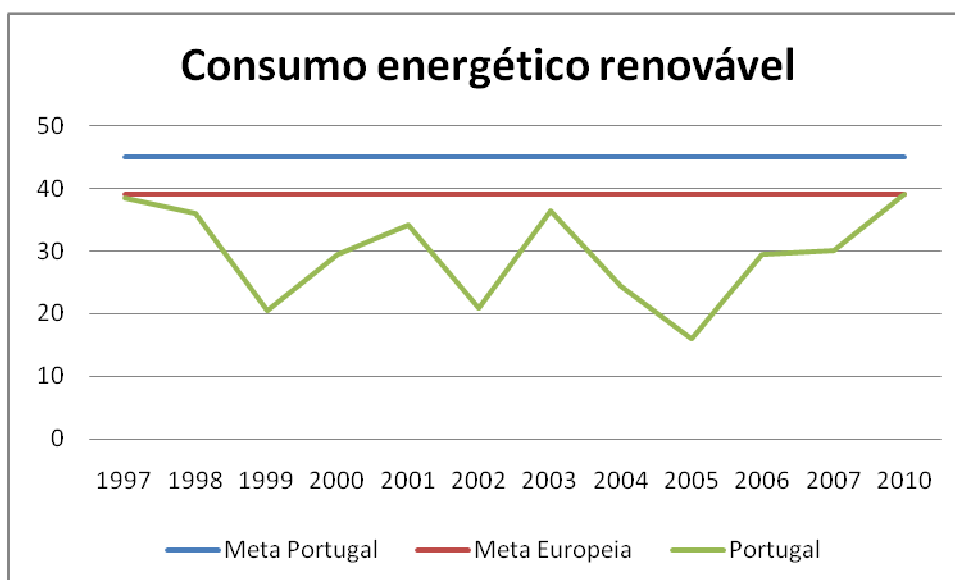
O Governo português assumiu alguns compromissos energéticos e ambientais para 2010, bem como benefícios associados à introdução das fontes de microgeração no Sistema Eléctrico Nacional:

- Restringir as suas emissões de gases de efeito de estufa para níveis apenas 27% superiores às de 1990, de acordo com o Protocolo de Quioto (considera-se o ano 2010

<sup>28</sup> Toe – Sigla para representar o equivalente a uma tonelada de petróleo (Ton of Oil Equivalent).

coo um ano intermédio do período de cumprimento do Protocolo de Quioto de 2008 a 2012).

- Atingir o nível de 45% da energia consumida a partir de fontes renováveis (sendo esta uma meta mais ambiciosa que a assumida no compromisso com a União Europeia – 39%), principalmente através de energia eólica e centrais hidroelétricas, sendo que a energia PV ainda representa uma pequena contribuição com cerca de 200 MW até 2010 [5].



**Gráfico 3 – Evolução do consumo energético português de fontes de energia renovável e distância às metas europeias (39% até 2010) e portuguesas (45% até 2010) (Adaptado de EUROSTAT, 2009).**

Como se pode verificar pelo gráfico seguinte, tem-se registado um aumento gradual ao longo da última década, com principal destaque para um significativo aumento no ano 2007, levando a crer que esse aumento continuará nos próximos anos.



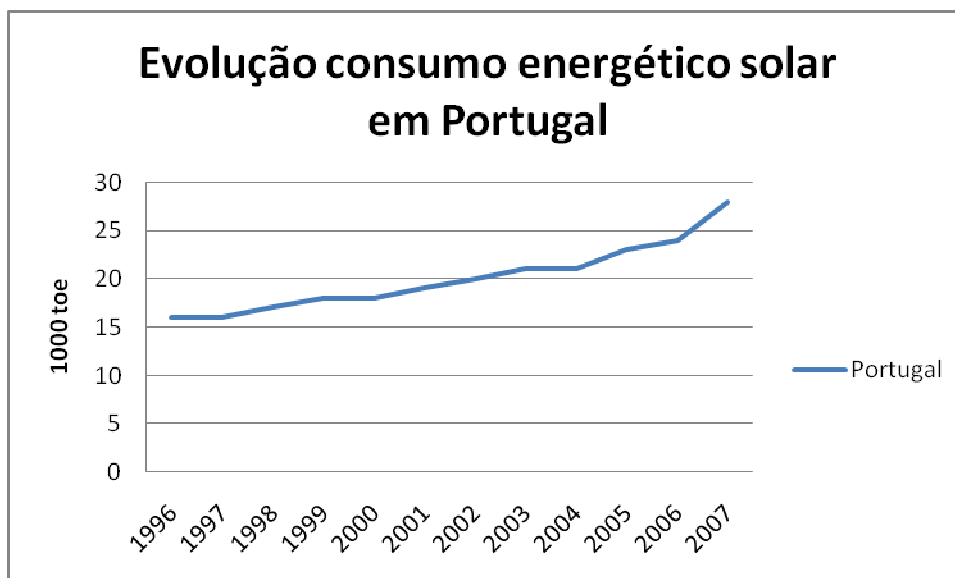


Gráfico 4 – Evolução consumo energético solar em Portugal (Adaptado de EUROSTAT, 2009).

Uma tarifa de venda superior à de compra é usada como incentivo ao uso de energias renováveis, dada a possibilidade de obter retorno financeiro. Esta tarifa pode ser aplicada sobre infra-estruturas independentes ou de acordo com esquemático de microgeração.

O programa associado à microgeração está operacional desde Março de 2008 e é constituído por dois tipos de regime: Geral e Bonificado. O regime bonificado está associado a recursos renováveis, sendo que a potência máxima de ligação é de 3,68 kW. Obriga à existência de colectores solares térmicos para AQS (Águas Quentes Sanitárias) com área mínima de 2 m<sup>2</sup> [5].

Os incentivos financeiros do Decreto-lei 363/2007 foram direccionados para os consumidores eléctricos portugueses no sector doméstico, tendo sido os painéis fotovoltaicos a tecnologia mais subsidiada. Das tecnologias abrangidas pelo regime bonificado presente no DL 363/2007 apenas foram estudados os painéis fotovoltaicos e as micro-eólicas por apresentarem potências de instalação até 3,68 kW e por serem tecnologias comercializáveis em Portugal.

A gestão da microgeração é suportada por uma plataforma na internet ([www.renovaveisnagora.pt](http://www.renovaveisnagora.pt)), onde é feito um registo e um pagamento, procedendo à sua instalação.

### 3.3.2. – Pesquisa e desenvolvimento

As actividades de pesquisa são feitas em algumas instituições e universidades e estão focadas maioritariamente nas tecnologias de película fina, fitas de silício cristalino e células orgânicas.

A aplicação de pesquisas, desenvolvimento e disseminação são efectuadas por diversas instituições, tais como o Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI); Centro de Estudos em Inovação, Tecnologias e Políticas de Desenvolvimento (IN+); Agências energéticas tais como a Agência para a Energia (ADENE) e outras agências regionais; Empresas como a EDP entre outras.

O INETI possui um departamento de Energias Renováveis que no plano específico do solar fotovoltaico é responsável pela demonstração e ensaio de sistemas, dimensionamento e projecto, integração em edifícios, redes híbridas, modelização dos aspectos Técnicos e Socioeconómicos, avaliação técnico-económica de projectos, monitorização de sistemas, auditorias [7].

Associações como a SPES – Sociedade Portuguesa de Energia Solar, APISOLAR – Associação Portuguesa da Indústria Solar, INETI e outras agências energéticas são responsáveis pela disseminação de várias actividades e projectos.

Alguns projectos de pesquisa e desenvolvimento resultaram em aplicações comerciais, como é o caso da WS Energia que desenvolveu e patenteou uma tecnologia denominada *DoubleSun* que consiste em espelhos planos que reflectem a energia solar para os módulos fotovoltaicos, juntamente com uma tecnologia de monitorização da posição do sol para aumentar a eficiência do sistema.

A MagPower desenvolveu e industrializou uma solução de fornecimento energético solar inovadora, consistindo em células fotovoltaicas concentradas baseado em células de tripla junção III-V e concentradores ópticos de Fresnel. Posteriormente possui também um sistema de monitorização da posição do sol, aproveitando a máxima radiação possível.

Um projecto que está a ser financiado pela Fundação da Faculdade de Ciências (FFC/FC/UL), tem como grande objectivo, o desenvolvimento de um novo processo de crescimento de fitas de silício para aplicações fotovoltaicas a partir do gás silano com o intuito de obter células de alta eficiência e baixo custo. Projecto designado por SDS: um novo processo para células solares de baixo custo [8].

Uma nova parceria entre indústrias e instituições académicas foi feita com o intuito de desenvolver protótipos de produtos cerâmicos fotovoltaicos integrados, de elevada eficiência, para o revestimento de edifícios que incorporem películas finas fotovoltaicas. O Consórcio é constituído por empresas na área da cerâmica e de integração, bem como entidades do Sistema Científico e Tecnológico Nacional tais como: CTCV – Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro, INETI, CFUM – Centro de Física da Universidade do Minho, CENIMAT – Centro de Investigação em Materiais da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e a ADENE.

De 2002 a 2004, cerca de 128 MWp em capacidade fotovoltaica foram colocados sobre a alçada da DGEG – Direcção-Geral de Energia e Geologia e receberam permissões de construção. Alguns destes sistemas, que totalizam cerca de 48 MWp iniciaram-se em 2008, com a instalação da Central Solar Fotovoltaica de Amareleja (Moura), uma das maiores do

mundo, da Acciona Energy com 262080 módulos fotovoltaicos e vai produzir 93 GWh em 25 anos [6].

Inúmeros projectos foram implementados ao longo do tempo em Portugal, sendo alguns exemplos enumerados:

- Projecto AMPER para escolas com módulos fotovoltaicos (Escola Secundária de Moura – 25 kWp; Escola Básica de Amareleja – 35 kWp; Escola Profissional de Moura – 15 kWp;) [7].
- Mini-redes de distribuição de energia eléctrica, que incluem o projecto de Ourique com 3 centrais híbridas independentes a alimentarem aldeias isoladas [7].
- Sistemas integrados conectados à rede eléctrica, como é os casos dos projectos BP Sunflower com uma potência total de 250 kWp, Projecto EDP-Setúbal e EDP-Faro [7].

A microgeração em Portugal tem revelado ser um sucesso, com 615 sistemas fotovoltaicos concluídos em 2008 correspondendo a 2,23 MW, e cerca de 2000 sistemas por construir, totalizando cerca de 6,6 MW de energia total produzida [5].

A nível industrial existem quatro empresas de manufacturação de módulos fotovoltaicos, sendo:

- Open Renewables, S.A.: Com módulos fotovoltaicos cristalinos de alta qualidade a serem manufacturados, constituindo uma capacidade anual de manufacturação que atinge os 35 MWp [5].
- Solar Plus: Onde películas finas constituídas por células de silício amorfo traduzem na manufacturação anual de 6,2 MWp [5].
- Moura c-Si da Acciona Energy e operada pela Fluitecnik com a capacidade de 20 MWp [5].
- Martifer Solar: Iniciada em Janeiro de 2009, com uma capacidade anual de 50 MWp e expansível a 100 MWp, com módulos mono e poli-cristalinas de silício [5].

## 4. Projectos do Programa-Quadro Europeu

A plataforma europeia existente de suporte à tecnologia fotovoltaica define os valores indicados na tabela em baixo como metas a atingir na agenda europeia. Esta tabela pode ajudar na definição de objectivos e ambições dos projectos incluídos no Programa-Quadro Europeu (FP6 e FP7).

|  | 1980 | Actualmente | 2015 | 2030 | Longa duração |
|--|------|-------------|------|------|---------------|
| Preço sistema pronto-a-usar (€/Wp)                       | >30  | 5           | 2.5  | 1    | 0.5           |
| Custo geração eléctrica sul Europa (€/kWh)               | >2   | 0.30        | 0.15 | 0.06 | 0.03          |
| Eficiência módulos comerciais planos                     | -8%  | -15%        | -20% | -25% | -40%          |
| Eficiência módulos comerciais concentradores             | ~10% | -25%        | -30% | -40% | -60%          |
| Tempo de retorno financeiro de sistema energético (anos) | >10  | 2           | 1    | 0.5  | 0.25          |

Tabela 2 – Metas a atingir definidas na agenda estratégica europeia (Adaptado de tabela 1 de [11]).

### 4.1. – FP6

Os projectos existentes no Programa-Quadro Europeu (FP6) podem ser encontrados na seguinte listagem [9]:

- CRYSTAL CLEAR (*Crystalline silicon PV: Low-cost, highly efficient and reliable modules*), cujo objectivo é desenvolver e integrar tecnologias cristalinas de silício para permitir a produção de módulos fotovoltaicos a €1/Wp, reduzindo os custos de manufacturação em 60%. Este projecto visa também baixar o tempo de retorno energético (<http://www.ipcrystalclear.info/>). Envolveu os seguintes parceiros:

|  |    |
|--|----|
| <a href="#">ECN</a> - the Energy research Centre of the Netherlands            | NL |
| <a href="#">BP Solar España</a>  | ES |
| <a href="#">CNRS InESS</a> - Institut d'Électronique du Solide et des Systèmes | FR |
| <a href="#">Deutsche Cell</a> ( <a href="#">SolarWorld AG</a> )                | DE |
| <a href="#">Deutsche Solar</a> ( <a href="#">SolarWorld AG</a> )               | DE |
| <a href="#">Fraunhofer-ISE</a> - Instituts für Solare Energiesysteme           | DE |
| <a href="#">IMEC</a>   | BE |
| <a href="#">Isofoton S.A.</a>  | ES |
| <a href="#">Photowatt</a>  | FR |
| <a href="#">REC</a>  | NO |
| <a href="#">Scanwafer</a>  | NO |
| <a href="#">Schott Solar</a>   | DE |

|   |    |
|---|----|
| <a href="#">Solarworld</a>                                      | DE |
| <a href="#">University of Konstanz</a>                          | DE |
| <a href="#">UPM-IES</a> (Instituto de Energía Solar)            | ES |
| <a href="#">University of Utrecht</a> (Department of Chemistry) | NL |

- FULL SPECTRUM (*A new wave making more efficient use of the solar Spectrum*), cujo objectivo é desenvolver conceitos científicos provados, mas não implementados e tentar provar novos conceitos. O desenvolvimento está subdividido em: multi-junção celular III-V para atingir 40% eficiência energética; Conversores solares termo-fotovoltaicos; Células e materiais de banda intermediária; Conceitos baseados em moléculas para utilização total do espectro solar; Tecnologias de manufacturação para novos conceitos (<http://www.fullspectrum-eu.org/>). Envolveu os seguintes parceiros:
    - Instituto de Energía Solar - Universidad Politécnica de Madrid (coordinator) [www.ies.upm.es](http://www.ies.upm.es)
    - Projektgesellschaft Solare Energiesysteme mbH ([www.pse.de](http://www.pse.de))
    - Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme ([www.ise.fhg.de/III-V](http://www.ise.fhg.de/III-V))
    - Ioffe Physico-Technical Institute ([www.ioffe.rssi.ru](http://www.ioffe.rssi.ru))
    - CEA-Département pour les Technologies des Energies Nouvelles ([www-leti.cea.fr](http://www-leti.cea.fr))
    - RWE - Space Solar Power ([www.rwe.com](http://www.rwe.com))
    - Philipps University of Marburg ([www.ub.uni-marburg.de](http://www.ub.uni-marburg.de))
    - Paul Scherrer Institute ([www.psi.ch](http://www.psi.ch))
    - University of Glasgow ([www.elec.gla.ac.uk](http://www.elec.gla.ac.uk))
    - Instituto de Catálisis y Petroleoquímica. Consejo Superior de Investigaciones Científicas ([www.icp.csic.es](http://www.icp.csic.es))
    - Energy Research Centre of the Netherlands ([www.ecn.nl](http://www.ecn.nl))
    - University of Utrecht ([www.uu.nl](http://www.uu.nl))
    - Imperial College of Science, Medicine and Technology ([www.ess.ph.ic.ac.uk](http://www.ess.ph.ic.ac.uk))
    - Fraunhofer-Institut fuer Angewandte Polymerforschung ([www.iap.fhg.de](http://www.iap.fhg.de))
    - Solaronix ([www.solaronix.com](http://www.solaronix.com))
    - ISOFOTON S.A ([www.isofoton.es](http://www.isofoton.es))
    - INSPIRA S.L ([www.inspira.es](http://www.inspira.es))
    - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability ([ies.jrc.cec.eu.int](http://ies.jrc.cec.eu.int))
    - University of Cyprus ([www.ucy.ac.cy](http://www.ucy.ac.cy))
- HICONPV (*High concentration PV power system*), cujo objectivo é o desenvolvimento, demonstração e ensaio de um sistema fotovoltaico de alta concentração com um factor de concentração de 1,000. O objectivo para o custo do sistema proposto é de €1/Wp até 2015. O maior desafio estará no desenvolvimento de um receptor de alta eficiência 2kWp III-V (<http://www.solucar.es/hiconpv/>).
- BIPV-CIS (*Improved building integration of PV using thin-film modules in CIS technology*), cujo objectivo é melhorar o potencial de CuInSe<sub>2</sub> em novos e existentes edifícios, incluindo novas técnicas de ligação e montagem. Sendo que os materiais desenvolvidos serão sujeitos a diversos testes de segurança (<http://www.zsw-bw.de/>).
- MOLYCELL (*Molecular Orientation, low bandgap and New Hybrid Device Concepts for the Improvement of Flexible Organic Solar Cells*), cujo objectivo é melhorar o tempo de vida e eficiência das células orgânicas celulares. Sendo que o foco será em todos as células orgânicas celulares, bem como em células solares híbridas orgânicas e nanocristais. O objectivo em termos de custo é atingir o €1/Wp (<http://www-molycell.cea.fr/>). Os membros do consórcio são os seguintes:

- Commissariat à l’Energie Atomique (CEA), Laboratoire Cellules et Composants, Gif-sur-Yvette, France
  - Interuniversity Micro-Elektronica Centrum vzw (IMEC), Division Chemistry, Diepenbeek, Belgium
  - Linzer Institut für Organische Solarzellen (LIOS), Johannes Kepler Universität Linz, Austria
  - Konarka Technologies Austria, Linz, Austria
  - Imperial College London (ICL), Centre for Electronic Materials and Devices, London, UK
  - The Energy Research Centre of Netherlands (ECN), Petten, The Netherlands
  - Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Institut des sciences et ingénierie chimiques, Lausanne, Switzerland
  - J. Heyrovsky Institute of Physical Chemistry, Academy of Sciences of the Czech Rep., Department of Electrochemistry, Prague, Czech Rep.
  - Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, FHG/ISE, Freiburg, Germany
  - Vilnius University, Faculty of Physics, Vilnius, Lithuania
  - Ege University, Solar Energy Institute, Bornova, Izmir, Turkey
- PV-CATAPULT (*European collaboration for identification of photovoltaic research and market opportunities, socio-economic studies, performance assessment and dissemination of PV-thermal technology*), cujo principal objectivo é acelerar o desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica para implementação no mercado, com principal destaque para a implementação de infra-estruturas e políticas em mercados energéticos emergentes em países em desenvolvimento (<http://www.pvcatapult.org/>).
- PV-SEC (*The Secretariat of the European Photovoltaic Technology Platform*), que visa providenciar suporte secretarial à *European Photovoltaic Technology Platform* (<http://www.eupvplatform.org/>).
- FLEXELLENCE (*Roll-to-roll technology for the production of high-efficiency low cost thin-film silicon photovoltaic modules*), cujo objectivo é desenvolver equipamentos e processos para a produção de módulos constituídos por películas finas baseados em células micro-cristalinas e células de silício amorfo. Substratos de baixo custo e integração de células monolíticas também serão analisados (<http://www2.unine.ch/flex/>). Os membros do consórcio são:
- Institute of Microtechnology (Photovoltaics and thin film electronics laboratory) of the University of Neuchâtel.
  - Energy Research Centre of the Netherlands (ECN)
  - VHF-Technologies (VHF)
  - Fraunhofer Institute for Electron beam and Plasma technology (FEP)
  - Roth and Rau (R&R)
  - University of Barcelona (UBA)
  - University of Ljubljana (UL-FEE)
  - Carl Baasel Lasertechnik (ROF)
- LARCIS (*Large-Area CIS Based Solar Modules for Highly Productive Manufacturing*), cujo objectivo passa por melhorar o potencial de manufatura dos módulos solares baseado em películas finas constituídas por  $\text{CuInSe}_2$ . Resultados deste projecto serão posteriormente produzidos por empresas parceiras (<http://www.zsw-bw.de/>).

- *FOXY (Development of solar-grade silicon feedstock for crystalline wafers and cells, by purification and crystallisation)*, cujo objectivo passa pelo desenvolvimento de refinação, purificação, cristalização e dos processos metalúrgicos para a energia solar baseada em silício, bem como para reciclados electrónicos baseados em silício, pretendendo-se atingir a meta dos 15 €/kg (<http://www.sintef.no>).
- *PERFORMANCE (A science base on photovoltaics performance for increased market transparency and customer confidence)*, no qual serão investigados as medidas práticas e limitações de corrente na calibração interior e exterior de edifícios. Precisoões de medidas serão melhoradas para as tecnologias tradicionais, bem como para as novas emergentes tecnologias. Os resultados deste projecto serão utilizados na estandardização de processos ao nível da CENELEC e IEC (<http://www.pv-performance.org/>). Envolveu os seguintes parceiros:
  - Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. (Fraunhofer ISE) Fraunhofer ISE Germany
  - PSE AG PSE Germany
  - European Photovoltaic Industry Association EPIA Belgium
  - Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas CIEMAT Spain
  - Politechnika Wroclawska (Wroclaw University of Technology) WrUT Poland
  - EUROPEAN COMMISSION - DIRECTORATE GENERAL JRC JRC Italy
  - TÜV Immissionsschutz und Energiesysteme GmbH TÜV Germany
  - Energy research Centre of the Netherlands (Energieonderzoek Centrum Nederland) ECN Netherlands
  - Loughborough University (CREST) CREST United Kingdom
  - COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE CEA France
  - Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (SUPSI - TISO) SUPSI Switzerland
  - University of Northumbria at Newcastle UNN United Kingdom
  - Zentrum fuer Sonnenenergie und Wasserstoffforschung Baden-Wuerttemberg ZSW Germany
  - Isofoton S.A. ISOFOTON Spain
  - Würth Elektronik Research GmbH WURTH Germany
  - Phoenix Solar AG PHX Germany
  - CONERGY AG CONERGY Germany
  - SCHOTT SOLAR GmbH SCHOTT Germany
  - SCHEUTEN SOLAR SYSTEMS bv Scheuten Netherlands
  - Österreichisches Forschungs- und Prüfzentrum Arsenal Ges.m.b.H. Arsenal Austria
  - Ben-Gurion University of the Negev BGU Israel
  - Tallinn University of Technology TTU Estonia
  - METEOCONTROL GmbH meteocontrol Germany
  - University of Applied Sciences (FH) Magdeburg-Stendal H2M Germany
  - SP Swedish National Testing and Research Institute SP Sweden
  - Polymer Competence Center Leoben GmbH PCCL Austria
  - Ecofys BV Ecofys Netherlands
  - IT Power Limited ITP United Kingdom
- *ATHLET (Advanced Thin Film Technologies for Cost Effective Photovoltaics)*, onde serão desenvolvidas vários tipos de tecnologia baseado em películas finas, na qual a espessura das células apresenta um potencial importante na redução de custos. Serão analisados processos de alta produtividade e de baixa temperatura que resultam também numa redução de custos (<http://www.hmi.de/projects/athlet/>).

- PV-MIPS (*Photovoltaic module with integrated power conversion and interconnection system*), cujo objectivo é o de reduzir o custo de sistemas fotovoltaicos em grelha através do desenvolvimento e demonstração de módulos fotovoltaicos com inversores integrados. Pretende-se atingir o custo de €0.3/Wp para os inversores e €3/Wp para todo o sistema (<http://www.pvmips.org/>). Os membros do consórcio eram os seguintes:
  - Institut fuer Solare Energieversorgungstechnik (ISET) e. V. <http://www.iset.uni-kassel.de>
  - Oesterreichisches Forschungs- und Pruefzentrum (arsenal research) [http://www.arsenal.ac.at/home\\_de.html](http://www.arsenal.ac.at/home_de.html)
  - Energy Research Centre of the Netherlands (ECN) <http://www.ecn.nl>
  - Wuerth Solar GmbH & Co. KG <http://www.wuerth-solar.de>
  - Zentrum fuer Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) <http://www.zsw-bw.de/>
  - Infineon Technologies AG <http://www.infineon.com>
  - Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO) <http://www.tno.nl/tno/index.xml>
  - HELIODOMI S.A. <http://www.heliiodomi.gr>
  - MVV Energie AG <http://www.mvv-energie-ag.de/>
  - Lafarge Roofing Benelux (LRB) <http://www.lafarge.nl>
  - Steca GmbH <http://www.steca.de>
  - Delta Energy Systems GmbH <http://www.delta-es.com>
  - Würth Elektronik GmbH & Co. KG (Würth Solergy) <http://www.we-online.de>
- SOLAR PLOTS (*Multiple Ownership Grid Connected PV Solar-Plots With Optimised Tracking And Low Concentration Reflectors*), cujo principal objectivo é o de fomentar a penetração no mercado de sistemas fotovoltaicos ligados em grelha no sul da Europa através do recurso de 250 investidores, removendo barreiras, desenvolvimento de novos produtos fotovoltaicos e mecanismos financeiros. O objectivo em termos de custos é de diminuir os custos de €7.07/Wp para €3.12/Wp.
- BITHINK (*Bifacial Thin Industrial multi-Crystalline Silicon Solar Cells*), cujo objectivo passa por reduzir significativamente o custo da energia fotovoltaica através do desenvolvimento e demonstração dos novos módulos constituídos por películas finas bifaciais. O projecto pretende obter baixos custos na tecnologia cristalina (abaixo de 1.6€/Wp) numa estrutura multi-megawatt, a ser implementada no fim do mesmo.
- PV-ERA-NET (*Networking and Integration of National and Regional Programmes in the Field of Photovoltaic (PV) Solar Energy Research and Technological Development (RTD) in the European Research Area (ERA)*), cuja missão é a de dinamizar uma rede constituída por programas regionais e de desenvolvimento de vários países com actividades através da interligação e integração desses mesmos programas.

## 4.2. – FP7

Os projectos existentes no Programa-Quadro Europeu (FP7) podem ser encontrados na seguinte listagem [10]:



- **ULTIMATE** (*Ultra thin solar cells for module assembly – tough and efficient*), cujo objectivo é a demonstração de módulos fotovoltaicos usando células solares substancialmente menos espessas que as actuais. A meta a atingir em relação à espessura das células é de 100  $\mu\text{m}$ . Usando estruturas de dispositivos avançados de células solares e tecnologia de módulos interligados, pretende-se aumentar a eficiência das células finas a 19% para células mono-cristalinas e 17.2% para células poli-cristalinas.
- **HETSI** (*Heterojunction solar cells based on a-Si c-Si*) tem o objectivo de desenhar, desenvolver e testar estruturas celulares solares baseadas em junções heterogéneas de alta eficiência. Este projecto cobre todos os aspectos da cadeia, desde a pesquisa à manufacturação.
- **SOLASYS** (*Next generation solar cell and module laser processing systems*), com este projecto pretende providenciar soluções de manufacturação com pequena influência mecânica e térmica no processamento de um produto. Inúmeros processos a laser serão desenvolvidos e aperfeiçoados com o intuito de melhorar a produtividade, eficiência e reduzir o custo de células e módulos solares.
- **ROBUST DSC** (*Efficient and robust dye sensitized solar cells and modules*), cujo objectivo é o desenvolvimento de materiais e processos de manufacturação para células solares sensibilizadas por corantes de longa duração e melhoramento de eficiência em cerca de 7%. Novos materiais e configurações serão desenvolvidos e testados de forma a atingir os 14% de aumento de eficiência.
- **HIGH EF** (*Large grained, low stress multi-crystalline silicon thin film solar cells on glass by a novel combined diode laser and solid phase crystallization process*), este projecto pretende providenciar a tecnologia de películas finas baseadas em silício com um inovador processo de forma a atingir mais de 10% de aumento de eficiência a preços competitivos. Este processo baseia-se na combinação de cristalização de silício amorfo com materiais de pequena espessura.
- **IBPOWER** (*Intermediate band materials and solar cells for photovoltaics with high efficiency and reduced cost*), cujo objectivo é a manufacturação de materiais e células solares baseadas em InGaN com a inserção de elementos de transição para matrizes semicondutoras III-V e de películas finas baseadas em células poli-cristalinas, com o uso de sistemas quânticos aplicados às células solares através de engenharia artificial.
- **APOLLON** (*Multi-Approach for high efficiency integrated and intelligent concentrating PV modules (systems)*), cujo objectivo passa por otimizar e desenvolver novas e existentes tecnologias de concentração solar baseadas em espelhos e focos de luz. Novos materiais e tecnologias de deposição serão usadas para aumentar a eficiência destes sistemas e reduzir os custos de produção dos mesmos.

### 4.3. – Conclusões

Os coordenadores dos projectos FP6, bem como as nacionalidades das empresas que participam nos projectos FP7 estão representados nos gráficos abaixo, respectivamente.

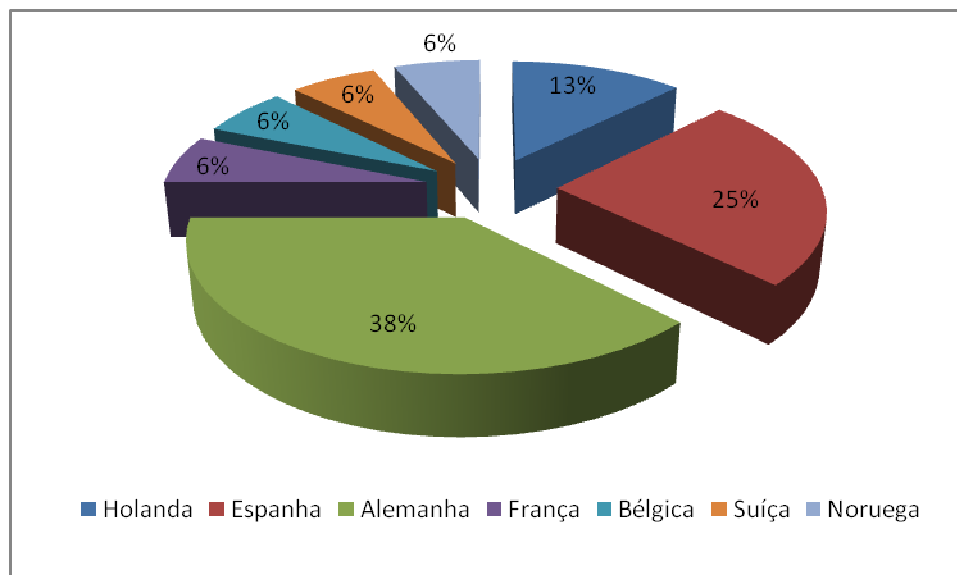


Gráfico 5 - Percentagem Países coordenadores dos projectos FP6.

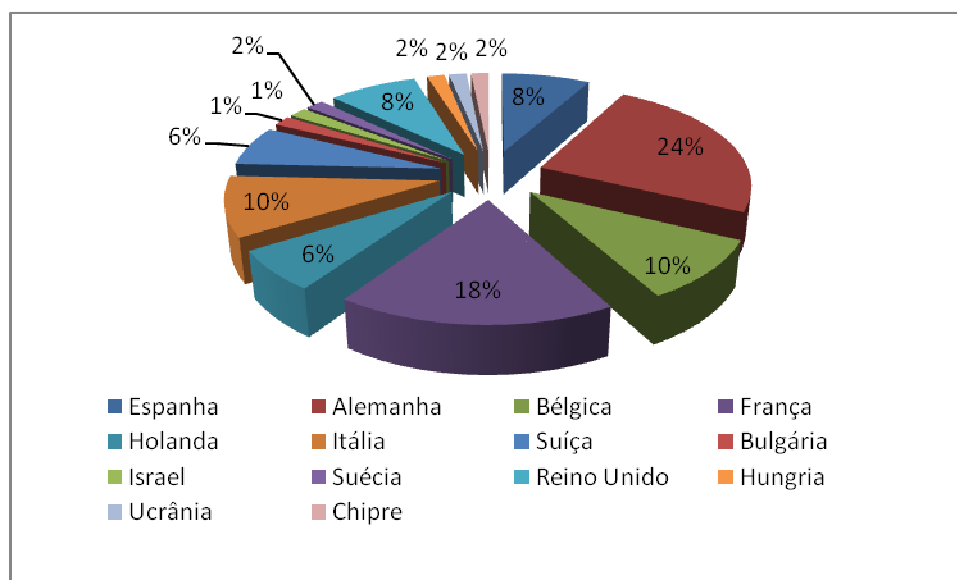


Gráfico 6 - Nacionalidade das empresas constituintes dos projectos FP7.

Tal como podemos verificar pelo gráfico 5 e 6, existe um grande dinamismo e participação da Alemanha nos projectos do programa-quadro europeu, nomeadamente FP6 e FP7, obtendo assim um maior destaque. Tal se deve às políticas do seu governo e aos incentivos mercantis fornecidos às empresas solares fotovoltaicas, seja para pesquisa e/ou

desenvolvimento. Outros países que merecem destaque pelo seu empenho e participação são a Espanha, Bélgica e França. Suíça, Noruega e Holanda, embora em menor escala, apresentam alguns investimentos e interesse em pesquisa e desenvolvimento.

Infelizmente Portugal não representa um país com forte investimento na pesquisa e desenvolvimento nas células fotovoltaicas, ficando-se pelo investimento na implementação de infra-estruturas e tecnologias fotovoltaicas já existentes.

## 5. Conclusão

O investimento contínuo na inovação na área das tecnologias fotovoltaicas é bastante importante na redução de custos dos módulos fotovoltaicos e no desenvolvimento de novos materiais com melhor eficiência ou desenvolvimento em materiais já existentes.

Pode-se concluir também que a redução de custos e o aumento de eficiência são condições necessárias para que a energia fotovoltaica se insira de uma forma competitiva no mercado das energias e represente uma alternativa válida às restantes fontes energéticas.

Se a energia fotovoltaica conseguir afirmar-se como uma fonte energética mais competitiva e válida, existirá uma menor dependência de recursos não renováveis, e consequentemente menores alterações climáticas.

Tem-se verificado um aumento do consumo energético solar, do qual se pode concluir que se deve essencialmente à redução dos custos dos módulos fotovoltaicos, aumento de eficiência energética, bem como à adopção de tarifas de regime bonificado, bem como outros benefícios fiscais.

O forte e continuado investimento em planos de longa duração e planos de suporte (caso Japão), bem como incentivos mercantis (caso Alemanha) resultam num aumento significativo do consumo energético solar e da quota de mercado de produtos fotovoltaicos, tornando os países extremamente competitivos e requisitados, aumentando também a competitividade entre outras formas de produção energética.

Podemos também concluir que Portugal não representa um país com forte participação na pesquisa e desenvolvimento nas células fotovoltaicas, apesar de alguns projectos pontuais elaborados por instituições académicas, ficando-se maioritariamente pelo investimento na implementação de infra-estruturas e tecnologias fotovoltaicas já existentes através do incentivo a tarifas de regime bonificado e benefícios fiscais de suporte à microgeração. Urge a necessidade de incentivar e suportar economicamente as empresas com o intuito de promover a inovação, pesquisa e desenvolvimento.

A competitividade exige inovação resultando em menores custos e melhores eficiências energéticas, que por sua vez resulta num aumento de competitividade e assim surge um ciclo cujos beneficiados somos todos nós, visto se tratar de uma forma energética segura, limpa e renovável.



- [16] D. M. Bagnall, M. Boreland, "Photovoltaic Technologies", ScienceDirect, 2008.
- [17] ([http://pt.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9lula\\_solar\\_CIGS](http://pt.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9lula_solar_CIGS))
- [18] State Energy Conservation Office, "Introduction to photovoltaic systems", Renewable Energy, Seco Fact sheet no. 11, 2008.
- [19] ([http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/solar\\_electricity/basics/types\\_of\\_pv.htm](http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/solar_electricity/basics/types_of_pv.htm))
- [20] Olivia Mah, NSPRI, "Fundamentals of Photovoltaic Materials", National Solar Power Research Institute, Inc., 12/21/98.  
(<http://userwww.sfsu.edu/~ciotola/solar/pv.pdf>)
- [21] ( <http://www.solarserver.de/solarmagazin/artikelmaerz2001-e.html>)
- [22] NREL, U.S. Department of Solar Energy, Electricity the Power of Choice, 2001
- [23] I. Sakata, Y. Tanaka, K.Koizawa, "Japan's new national R&D program for photovoltaics", NEDO, 2006
- [24] I. Hashimoto, "Present status of research and development of PV technology in Japan", Solar and Wind Energy Department, 2003
- [25] NEDO, "Overview of "PV Roadmap Toward 2030 (PV2030)" ", 2004
- [26] NEDO, "Energy and Environment Technology"

## 6 – Referências de imagens

- Fig. 1 – [http://www.porticus.org/bell/belllabs\\_photovoltaics.html](http://www.porticus.org/bell/belllabs_photovoltaics.html)
- Fig. 2 – <http://www.apec-vc.or.jp/e/modules/tinyd00/content/images/12000/outline03.jpg>
- Fig. 3 – State Energy Conservation Office, "Introduction to photovoltaic systems", Renewable Energy, Seco Fact sheet no. 11, 2008.
- Fig. 4 – [http://farm1.static.flickr.com/22/28023945\\_d7a4bb899c.jpg?v=0](http://farm1.static.flickr.com/22/28023945_d7a4bb899c.jpg?v=0)
- Fig. 5 – <http://www.sciencedaily.com/images/2009/05/090502083917.jpg>
- Fig. 6 – <http://www.csa.com/discoveryguides/green/images/photovoltaic.gif>
- Fig. 7 – [http://www.windenergy.com/\\_images/about\\_typical\\_system.png](http://www.windenergy.com/_images/about_typical_system.png)
- Fig. 8 – <http://www.climatecareelectrical.com.au/images/pv-system.jpg>
- Fig. 9 – <http://www.solar-facts.com/panels/panel-types.php>
- Fig. 10 – [http://www.solar-designs.com.au/polycrystalline\\_cell\\_small.jpg](http://www.solar-designs.com.au/polycrystalline_cell_small.jpg)

Fig. 11 – <http://www.allamericanpatriots.com/files/images/2008-03-thin-film-solar-park-germany.jpg>

Fig. 12 – <http://static.howstuffworks.com/gif/thin-film-solar-cells-1a.jpg>

Fig. 13 – <http://static.howstuffworks.com/gif/thin-film-solar-cells-2a.jpg>

Fig. 14, 15, 16, 17, 18, 19 – <http://cordis.europa.eu/technology-platforms/pdf/photovoltaics.pdf>

Fig. 20 – NEDO, “Overview of “PV Roadmap Toward 2030 (PV2030)” ”, 2004